



Bruno Miguel
Rodrigues e Silva Rés **Soluções Tecnológicas e Impacto da Mobilidade**
Numa Rede WiMAX



**Bruno Miguel
Rodrigues e Silva Rés**

**Soluções Tecnológicas e Impacto da Mobilidade
Numa Rede WiMAX**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e de Telecomunicações, realizada sob a orientação científica da Prof. Dra. Susana Sargento, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à memória da minha Mãe.

o júri

presidente

Prof. Dr. Nuno Borges
Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática
da Universidade de Aveiro

orientador

Prof. Dra. Susana Sargento
Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e
Informática da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Dra. Marília Curado
Professora Auxiliar do Departamento de Informática da Universidade de Coimbra

agradecimentos

Agradeço à Professora Susana Sargento, que sempre se mostrou disponível para esclarecer quaisquer dúvidas, dando sempre as melhores orientações para que o trabalho corresse bem.

Agradeço também à minha família, cujo apoio ao longo de todo o meu trajecto académico foi inexcelável.

Agradeço a todos os meus amigos, que proporcionaram os melhores momentos da minha vida.

palavras-chave

WiMAX, 802.16, OFDM, OFDMA, Planeamento Celular, Modelos de tráfego, Classes de Serviço

resumo

A área das telecomunicações tem sofrido uma evolução enorme nos últimos anos. Tanto em termos de comunicações sem fios, como em termos de ligações de banda larga, assistiu-se a uma adesão massiva por parte do mercado, o que se traduziu num crescimento enorme, já que a tecnologia tem que estar um passo à frente da procura, de forma a suprir as carências dos consumidores. Assim, a evolução persegue um objectivo cada vez mais claro: possibilidade de possuir conectividade de banda larga em qualquer lugar e instante. Neste contexto, aparece a nova tecnologia WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) como uma possibilidade para atingir este fim.

O assunto desta dissertação incide no estudo da tecnologia WiMAX, mais concretamente o estudo da norma IEEE802.16 e soluções tecnológicas existentes com o intuito de apresentar resultados possíveis para a implementação de uma rede WiMAX. Foi desenvolvida uma aplicação para projectar possíveis redes WiMAX, que permite simplificar e automatizar o processo de planeamento de uma rede WiMAX.

Foram idealizados cenários de utilização com perfis bem definidos. São apresentados resultados de possíveis implementações de uma rede WiMAX nestes cenários. É também usada a aplicação desenvolvida para apresentar resultados concretos de planeamento de uma rede WiMAX.

keywords

WiMAX, 802.16, OFDM, OFDMA, Cell Planning, Traffic Models, Classes of Service

abstract

The communication industry has suffered massive evolution throughout the past years. This has happened both in wireless communications and broadband wired communications, with major adoption by the market. This has conducted into a big growth, because the technology must always be one step ahead of the demand, in order to be capable of fulfilling the needs of the consumers. Therefore, the evolution pursues one clear goal: the possibility to establish a broadband connection anywhere and anytime. In this context, the new WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) technology appears as a possibility to reach this goal.

The subject of this thesis is the study of the WiMAX technology, and more concretely the study of the IEEE802.16 standard and the existent technological solutions in order to present possible solutions of a WiMAX network deployment. An application has been developed to project a WiMAX network, that allows to simplify and automatize the planning procedure of a WiMAX network.

Some utilization scenarios were idealized, with well defined profiles. Results of possible WiMAX deployment are presented, in the context of these scenarios. There are also results of WiMAX planning through the use of the developed application.

Conteúdos

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xii
Acrónimos	xiii
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Norma IEEE802.16	5
2.1. Pequena Resenha Histórica	5
2.2. Camadas protocolares da norma IEEE 802.16	8
2.3. Arquitectura de Rede	9
2.4. Camada PHY	10
2.4.1. Interfaces	10
2.4.2. OFDM	11
2.4.3. Capacidade de um Sistema OFDM	14
2.5. Camada MAC	16
2.5.1. QoS e Classes de Serviço	18
2.6. Segurança no WiMAX	21
2.7. Aplicações do WiMAX	22
2.7.1. WMAN	22
2.7.2. Acesso à Banda Larga em Áreas Rurais	22
2.7.3. Outras aplicações	23
2.8. Sumário	25
3. Mobilidade	27
3.1. Subchannelization	29
3.2. Capacidade de um Sistema S-OFDMA	30
3.3. Soluções Tecnológicas	34
3.3.1. SISO	35
3.3.2. SIMO	35
3.3.3. MIMO	35
3.3.4. Adaptive Beamforming	36
3.4. Outros Aspectos Introduzidos pela Mobilidade	37
3.4.1. Handover	37
3.4.2. Características de poupança de energia	38
3.4.3. Serviços de Broadcast e Multicast	39
3.5. Sumário	39
4. Parâmetros para Planeamento de uma Rede WiMAX	41
4.1. Caracterização dos Serviços	41
4.2. Alcance e Cobertura	44
4.3. Sistemas Celulares	49
4.4. Análise do espectro disponível na viabilidade da tecnologia	50
4.5. Sectorização	52
4.6. Sumário	53
5. Planeamento Celular	55
5.1. Cenários Considerados e Parâmetros dos Serviços	55
5.2. Célula WiMAX para cada cenário	60
5.2.1. Cenário A (Rural Residencial)	61
5.2.2. Cenário B (Urbano Residencial)	67
5.2.3. Cenário C (Urbano Empresarial)	71
5.2.4. Cenário D (Urbano Misto)	75
5.3. Sumário	80

6.	Ferramenta de Planeamento de Redes WiMAX	81
6.1	Introdução	81
6.2.	Estrutura da aplicação	82
6.3.	Funcionamento	84
6.4	Implementação das funcionalidades da ferramenta	88
6.5.	Resultados Práticos	92
6.6.	Sumário	97
7.	Conclusões e Trabalho Futuro	99
7.1	Conclusões	99
7.2.	Trabalho Futuro	100
8.	Referências	103

Índice de Figuras

Fig. 1 - Crescimento mundial do número de utilizadores durante o período de 1990-2006 para telefonia móvel, uso da Internet e acesso à Banda Larga	1
Fig.2.1 – Camadas protocolares da norma IEEE 802.16 [3]	8
Fig.2.2 – As diferentes topologias WiMAX: a primeira imagem refere-se a PMP e a segunda a Mesh	9
Fig.2.3 – Conceito do sinal OFDM: (a) técnica multi-portadora convencional; (b) técnica de modulação ortogonal	13
Fig.2.4 – A necessidade de QoS	18
Fig.2.5 – Exemplo de WMAN	22
Fig.2.6 – Aplicações Várias do WiMAX	24
Fig.3.1 – Downlink em PUSC	31
Fig.3.2 – Uplink em PUSC	32
Fig.4.1 – Gráfico das perdas de percurso em função da variação da distância à BS.	46
Fig.4.2 – Gráfico das perdas de percurso em função da variação da altura da BS, à distância de 1Km.	47
Fig. 4.3 – Comparação entre o SINR (Relação entre sinal, interferência e ruído), para uma célula com 1 sector (à esquerda) e 3 sectores (à direita), tendo ambos os sistemas um factor de reuso de 3	52
Fig. 4.4 – Diferentes esquemas de sectorização e reuso de frequências	53
Fig.5.1 – Cenário de utilização adoptado	56
Fig.5.2 – Gráfico da Largura de Banda necessária em função do número de utilizadores, para o horário diurno	58
Fig. 5.3 - Gráficos ilustrativos das percentagens de tráfego para cada classe em cada cenário, no horário diurno	59
Fig.5.4 – Gráficos ilustrativos das percentagens de tráfego para cada classe em cada cenário, no horário nocturno	60
Fig. 5.5 – Esboço de uma célula WiMAX	61
Fig.5.6 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário A)	62
Fig.5.7 – BS com 3 sectores	63
Fig.5.8 – Capacidade da célula sectorizada em função do número de utilizadores (Cenário A)	63
Fig.5.9 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário A)	64
Fig.5.10 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário A)	65
Fig.5.11 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário A)	65
Fig.5.12 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário A)	66
Fig.5.13 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células	66
Fig. 5.14 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário B)	68
Fig.5.15 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário B)	68
Fig.5.16 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário B)	69
Fig.5.17 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário B)	69
Fig.5.18 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário B)	70
Fig.5.19 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de	70

utilizadores e distância entre células (Cenário B)	
Fig.5.20 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário C)	72
Fig.5.21 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário C)	72
Fig.5.22 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário C)	73
Fig.5.23 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário C)	73
Fig.5.24 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário C)	74
Fig.5.25 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células (Cenário C)	74
Fig.5.26 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário D)	76
Fig.5.27 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário D)	76
Fig.5.28 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário D)	77
Fig.5.29 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário D)	77
Fig.5.30 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário D)	78
Fig.5.31 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células (Cenário D)	78
Fig. 5.32 – Possível implementação de uma rede WiMAX com factor de reuso de 3	79
Fig. 6.1 – Fases de planeamento de uma rede celular	81
Fig. 6.2 – Diagrama simplificado do planeamento de uma rede celular	82
Fig. 6.3 – Vista da janela inicial da ferramenta de planeamento de uma rede WiMAX	84
Fig. 6.4 – Vista do separador “Perfis” da ferramenta de planeamento de uma rede WiMAX	85
Fig. 6.5 – Vista do separador “Tecnologia” da ferramenta de planeamento de uma rede WiMAX	86
Fig. 6.6 – Vista da ferramenta de cálculo	87
Fig. 6.7 – Parâmetros tecnológicos utilizados na simulação	92
Fig. 6.8 – Perfis de utilizador presentes na rede	93
Fig. 6.9 – Primeira solução apresentada pela ferramenta de planeamento celular	94
Fig. 6.10 – Solução possível apresentada pela ferramenta de planeamento celular, com 3 sectores	95
Fig. 6.11 – Outra possível solução apresentada pela ferramenta de planeamento celular	95
Fig. 6.12 – Outra possível solução apresentada pela ferramenta de planeamento celular, com maior alcance	96

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Evolução da norma IEEE 802.16	7
Tabela 2.2 – Especificação da designação das interfaces IEEE 802.16	11
Tabela 2.3 – Cálculo do tempo de símbolo	15
Tabela 2.4 – Codificação do canal para cada modulação	16
Tabela 2.5 – Valores de capacidade útil calculados	16
Tabela 3.1 – Parâmetros de escalabilidade OFDMA, para cada perfil de WiMAX móvel	30
Tabela 3.2 – Capacidade útil para cada modulação, em downlink PUSC	33
Tabela 3.3 – Capacidade útil para cada modulação, em uplink PUSC	34
Tabela 4.1 – Requisitos de cada serviço	42
Tabela 4.2 – Caracterização dos diversos cenários em estudo	43
Tabela 4.3 – Classe de serviço para cada aplicação	44
Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo SUI	45
Tabela 4.5 – Potência no receptor (parâmetros e respectivas unidades)	47
Tabela 4.6 – SNR(Rx) para as diferentes modulações [1]	48
Tabela 4.7 – Sensibilidade no receptor para cada modulação e largura de banda	48
Tabela 5.1 – Utilização dos vários cenários no horário diurno	57
Tabela 5.2 – Utilização dos vários cenários no horário noturno	58
Tabela 5.3 – Valores usados para simulação no cenário A	61
Tabela 5.4 – Cobertura por modulação no cenário A	62
Tabela 5.5 – Valores usados para simulação no cenário B	67
Tabela 5.6 – Cobertura para cada modulação no cenário B	67
Tabela 5.7 – Cobertura para cada modulação no cenário C	71
Tabela 5.8 – Valores usados para simulação no cenário D	75
Tabela 5.9 – Cobertura para cada modulação no cenário C	75
Tabela 6.1 – Funcionamento da aplicação	91

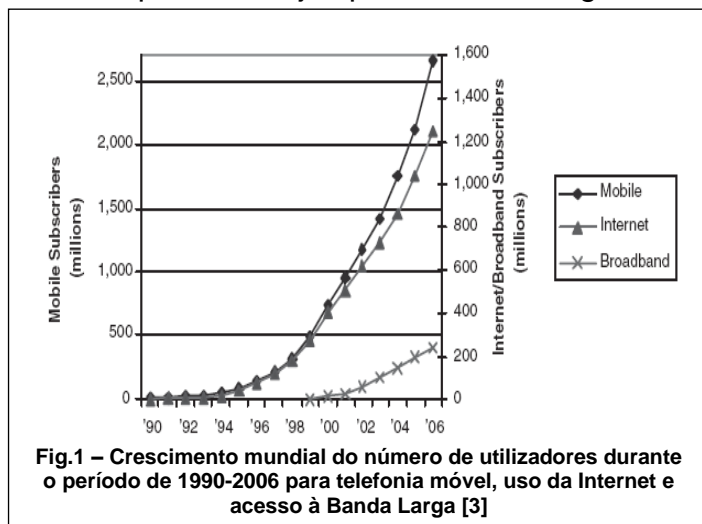
Acrónimos

AMC	<i>Adaptive Modulation Coding</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BS	<i>Base Station</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
CID	<i>Connection Identifier</i>
CPS	<i>Common Part Sublayer</i>
CS	<i>Convergence Sublayer</i>
DAMA	<i>Demand Assignment Multiple Access</i>
DFT	<i>Direct Fourier Transformation</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MAP	<i>Medium Access Protocol</i>
MBS	<i>Mobile Broadcast Service</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P2P	<i>Peer 2 Peer</i>
PMP	<i>Point-to-Multipoint</i>
PUSC	<i>Partial Usage of SubCarrier</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>
SFID	<i>Service Flow Identifier</i>
SIG	<i>Sistema de Informação Geográfica</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
SINR	<i>Signal Interference Noise Ratio</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
S-OFDMA	<i>Scalable OFDMA</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WMAN	<i>Wireless MAN</i>

1. Introdução

1.1. Motivação

A área das telecomunicações sofreu uma evolução enorme nos últimos anos. No caso das comunicações móveis o número de utilizadores tem crescido de forma exponencial, já que em 1990 registava-se um número na ordem dos 11



milhões de utilizadores, que evoluiu para mais de 2 biliões em 2005, como se pode ver através da figura 1. Durante este período também se assistiu ao crescimento rápido da Internet, que inicialmente era um projecto meramente académico e evoluiu para um serviço completo com biliões

de utilizadores. Como é lógico, este crescimento da Internet conduziu à procura de ligações cada vez mais rápidas que permitiram o desenvolvimento de cada vez mais serviços baseados no uso da Internet. Paralelamente, desenvolveu-se a utilização massiva de Banda Larga, alargando assim cada vez mais o espectro de utilização da Internet e tornando os seus utilizadores cada vez mais exigentes. Já com soluções “wired” bastante consolidadas no mercado, surge então o conceito de *Broadband Wireless Access* (BWA) como uma solução bastante promissora para fornecer tanto ao utilizador final como a pequenas e médias empresas ligações de alta velocidade. Torna-se também possível servir áreas cuja implementação seria bastante difícil e/ou dispendiosa, como por exemplo áreas de difícil acesso, ou zonas isoladas, tudo isto devido à natureza das ligações sem fios. Torna-se assim bastante mais rápido implementar uma ligação de alta velocidade, com características importantes como escalabilidade e flexibilidade.

Neste contexto, a tecnologia WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) surge como uma tecnologia BWA, com características poderosas em termos de desempenho, na medida em que é capaz de fornecer taxas de transferência elevadas de dados a grandes distâncias e para vários utilizadores em simultâneo (em cenários com ou sem linha de vista). Tem, então, potencial

para não só se afirmar como uma tecnologia-chave para os ambientes móveis da próxima geração, mas também fornecer uma alternativa viável e mais económica às ligações convencionais DSL ou Cabo.

Para implementar uma rede WiMAX e tirar partido de todas as suas funcionalidades, é necessário haver um estudo prévio bastante cuidado. O planeamento celular depende não só de aspectos relacionados com a tecnologia mas também de muitos outros aspectos relacionados com o ambiente onde é implementada a rede, já que a existência de vários obstáculos poderá condicionar de sobremaneira o desempenho e alcance da mesma. Para além disso, também têm que ser levados em linha de conta os requisitos que é necessário satisfazer, para que a rede possa servir todos os potenciais utilizadores.

1.2. Objectivos

Os objectivos desta dissertação prendem-se com o estudo da norma IEEE802.16, para dessa forma poder apontar quais as soluções tecnológicas que oferece, projectar uma rede sem fios de dimensão metropolitana e desenvolver uma ferramenta que optimize este processo. Outro dos objectivos passa por abordar a questão da mobilidade, fundamentando quais as bases em que esta assenta, na tecnologia WiMAX.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta um estudo à norma IEEE 802.16, destacando algumas das suas principais características.
- O capítulo 3 introduz o assunto da mobilidade.
- O capítulo 4 faz um estudo detalhado dos parâmetros para planeamento de um sistema WiMAX.
- O capítulo 5 faz um estudo detalhado para quatro cenários previamente idealizados.
- O capítulo 6 apresenta a aplicação desenvolvida no âmbito desta dissertação, cujo modo de funcionamento está intimamente ligado com o estudo realizado no capítulo 5.

- O capítulo 7 apresenta as conclusões finais após o desenvolvimento do trabalho, bem como o trabalho futuro.

2. Norma IEEE802.16

Este capítulo tem como objectivo oferecer uma perspectiva geral acerca da norma IEEE 802.16, apresentando algumas das características mais importantes. É, por outro lado, também onde é introduzido o estudo camada física, apresentando cálculos que serão importantes em capítulos seguintes.

O capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: inicialmente, na secção 2.1, é feita uma pequena introdução em que se fala da evolução da tecnologia desde o seu aparecimento. De seguida, em 2.2, são apresentadas as camadas protocolares da norma, com uma explicação acerca de cada uma. A arquitectura de rede vem a seguir (2.3), mostrando as possíveis topologias que o WiMAX suporta. A secção 2.4 subdivide-se em três partes principais: uma das quais fala acerca das interfaces existentes na tecnologia WiMAX, e as outras duas focam-se no estudo de *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Destaca-se a secção de capacidade de um sistema OFDM, pois são realizados cálculos que mais à frente serão importantes. A secção 2.5 tem como assunto a camada de controlo de acesso ao meio, introduzindo também o assunto de qualidade e classes de serviço. A secção 2.6 dá uma vista geral acerca de aspectos de segurança que a tecnologia contempla. Por fim, a secção 2.7 apresenta várias aplicações possíveis do WiMAX, desde a cobertura de áreas metropolitanas até ao acesso a áreas rurais.

2.1. Pequena Resenha Histórica

No final dos anos 90 começaram a ser desenvolvidos produtos direccionados para BWA, por vários fabricantes de equipamentos de telecomunicações. No entanto, havia a necessidade de criação de uma norma, para uniformizar os equipamentos desenvolvidos. Assim, para responder a esta necessidade, foi criado o grupo de trabalho 802.16, que desde então tem trabalhado para desenvolver normas para aplicações fixas e móveis de BWA. A norma IEEE 802.16 contém especificações das camadas físicas (PHY) e acesso ao meio (MAC) para acesso *wireless* de banda larga. Desde a sua primeira versão (2001) até à actualidade, a norma tem sido submetida a diversas alterações, sendo-lhe adicionadas novas funcionalidades.

No entanto, o grupo de trabalho referido é responsável por criar especificações para a família de normas IEEE 802.16, mas não é responsável por testá-las. Nesse sentido, foi criado em 2001 um grupo industrial denominado WiMAX Forum. A sua missão é desenvolver e certificar produtos baseados neste standard, tendo como objectivo estabelecer compatibilidade e interoperabilidade total entre eles. Apesar do WiMAX Forum ter como objectivo o teste de equipamentos, desde então a palavra WiMAX e a norma IEEE 802.16 são facilmente associados como sinónimos, provavelmente por WiMAX ser uma palavra mais acessível.

A primeira norma da família foi aprovada em Dezembro de 2001 – IEEE 802.16-2001 – focava aplicações fixas de WiMAX, mas surgindo já com um conceito de *Wireless MAN (Metropolitan Area Network)*. O acesso à rede aos edifícios era através de antenas exteriores, que comunicavam através de ondas rádio a uma BS (*Base Station*) usando uma infra-estrutura do tipo ponto-multiponto (PMP) e operando a frequências compreendidas entre 10 e 66 GHz. Ou seja, está-se perante uma tecnologia que se apresenta como uma alternativa às soluções já existentes “terrestres”, como DSL e Cabo. Não era, no entanto uma norma adequada para BWA, por razões relacionados com espectro, já que as frequências em espectro sujeito a licença introduzem desafios ao nível de cumprimentos de onda curtos, limitados a propagação em linha de vista (LOS). Assim, este motivo foi um dos que motivou as várias emendas que a norma sofreu.

Em 2002 surgiu a IEEE 802.16c, cujo objectivo foi de assegurar interoperabilidade entre as várias soluções de serviços de LMDS (*Local multipoint Distribution Service*) existentes na gama de 10 a 66 GHz. Para além disto, esta norma também se direccionou para a realização de testes, avaliações de performance e criação de perfis. Uma das principais características desta norma é o facto de ser especificado como uma rede tecnologicamente independente, ou seja, é possível correr sobre ATM, IP ou *frame relay*. Outra emenda à norma foi a IEEE 802.16b, cuja adição principal foi o suporte de qualidade de serviço (QoS), ao assegurar serviços diferenciados para diferentes tipos de tráfego. Em 2003, surge a versão final da norma IEEE 802.16-2001, em que são melhorados vários

aspectos. Entre eles a melhoria do controlo de acesso ao meio, que suportava múltiplas especificações na camada física na faixa de 2-11 GHz. Passou então a ser possível operação sem linha de vista (*NLOS*) devido à inclusão de gamas inferiores a 11GHz, extendendo também o alcance geográfico da rede. Surgiram então novos desafios, como o estudo de fenómenos que degradam o sinal, o que motivou a inclusão de novas funcionalidades, como técnicas avançadas de controlo de potência e técnicas de antenas adaptativas. Apareceu também a opção de implementação de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), sendo alternativa à modulação *single carrier*.

Em 2004 apareceu a norma IEEE802.16d, mais tarde designada por IEEE 802.16-2004. Esta substituiu as versões anteriores, consolidando-as, assumindo-se como uma solução de WiMAX fixo. Já em 2005 o grupo de trabalho aprovou a norma IEEE802.16e-2005, cujas mais valias introduzidas diziam respeito ao suporte de mobilidade, oferecendo, assim, soluções nómadas e móveis para a tecnologia. A evolução não se ficou por aqui, no entanto no âmbito desta dissertação as normas IEEE802.16-2004 e IEEE802.16e-2005 são as mais importantes.

	IEEE 802.16-2001	IEEE 802.16 ^a	IEEE802.16-2004	IEEE802.16e-2005
Ano	(Dezembro) 2001	(Janeiro) 2003	(Junho) 2004	(Dezembro) 2005
Espectro	10-66 GHz	2-11 GHz	2-11 GHz	2-6 GHz
Condições de Canal	LOS	NLOS	NLOS	NLOS
Esquemas de transmissão	Single Carrier	Single Carrier, 256 OFDM	Single Carrier, 256 OFDM ou 2048 OFDM	Single Carrier, 256 OFDM ou S-ODMA com 128,512,1024 ou 2048 subportadoras
Modulação	QPSK, 16-QAM, 64 QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Mobilidade	Fixo	Fixo	Fixo / Nómada	Nómada / Móvel

Tabela 2.1: Evolução da norma IEEE 802.16

2.2. Camadas protocolares da norma IEEE 802.16

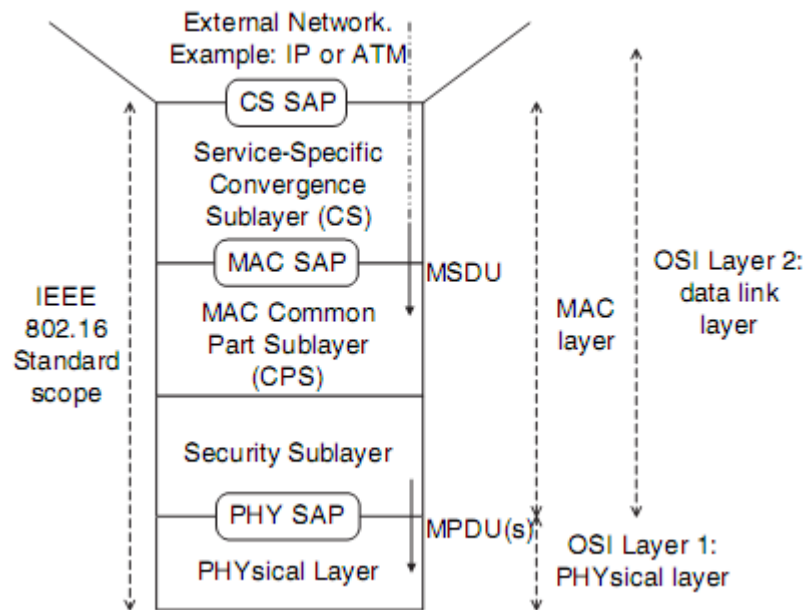


Fig.2.1 – Camadas protocolares da norma IEEE 802.16 [3]

A norma IEEE 802.16 tem a sua estrutura protocolar bastante bem definida e cobre as 2 camadas inferiores no modelo OSI: MAC e PHY. A camada MAC tem como responsabilidade a determinação de qual *Subscriber Station* (SS) pode aceder à rede e divide-se em 3 subcamadas, que são *Service Specific Convergence Sublayer* (CS), *MAC Common Part Sublayer* (CPS) e *Security Sublayer*, tal como se pode verificar na figura 2.1.

A primeira (CS) transforma dados recebidos através de *CS Service Access Point* (SAP) em pacotes MAC. Esta transformação mapeia informação externa em informação IEEE 802.16 MAC, como fluxos de serviço e *connection identifier* (CID). As mensagens são do tipo *Service Data Unit* (SDU). Há mais que uma especificação disponível de CS, já que há 2 tipos de tráfego suportados através de redes IEEE 802.16: ATM e pacotes.

No que concerne à camada MAC CPS, esta é parte nuclear da camada MAC, uma vez que define o método de acesso ao meio. Fornece funções relacionadas com duplexagem e *channelization*, acesso ao canal, entre outros. São assim dadas regras e mecanismos para acesso ao sistema, alocação de largura de banda e manutenção da ligação. É também aqui que são feitas decisões relativas a escalonamento (QoS).

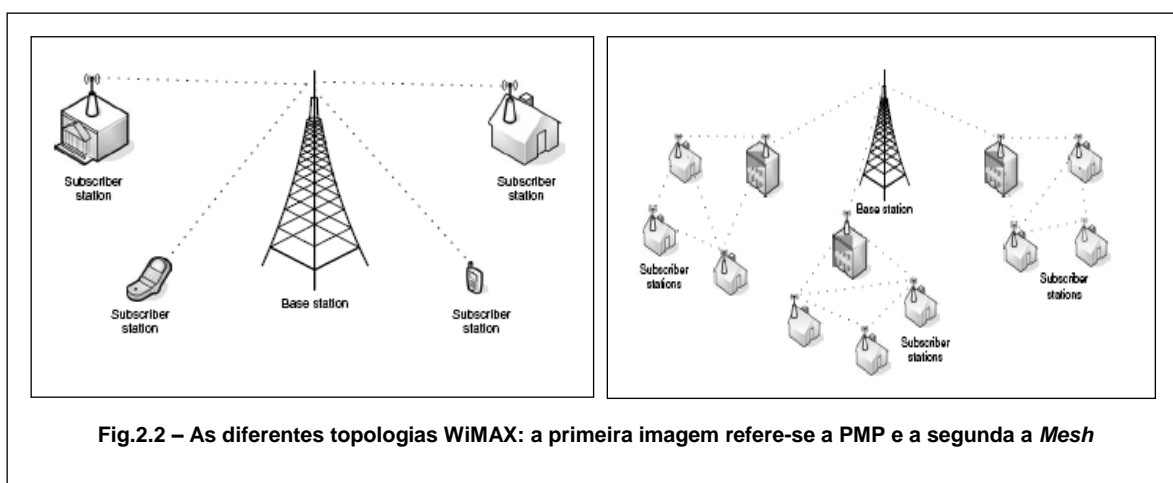
A *Security Sublayer* está compreendida entre a CPS e a camada PHY. Fornece mecanismos de encriptação e decryptação de dados nas comunicações com a camada PHY, sendo também usada para autenticação e troca de chaves de segurança.

2.3. Arquitectura de Rede

Uma rede 802.16 assemelha-se a uma rede celular de telefones. Cada célula consiste numa BS e uma (ou mais) SS (*Subscriber Station*). Assim, no que diz respeito a topologias de implementação, estão definidas 2 bem distintas no WiMAX: ponto-a-ponto (PTP) e ponto-multiponto (PMP). A primeira refere-se a uma ligação dedicada que oferece conectividade somente a dois nós: BS e SS. Trata-se da topologia que utiliza os seus recursos de forma mais ineficiente, o que assim aumenta consideravelmente os custos de operação. Já a topologia PMP serve um grupo de SS em vez de efectuar ligações. Assim a largura de banda é distribuída por todos os utilizadores reduzindo assim o custo por cada utilizador.

Cabe à BS a função de fornecer às SS ligação à rede *core* e, desta forma, oferecer conectividade. Uma SS poderá assumir a forma de uma antena fixa exterior, ou um equipamento terminal que poderá ser um dispositivo móvel ou um componente para um computador. No primeiro caso, a conectividade oferecida aos utilizadores que se encontrem dentro do edifício onde se encontra a antena poderá ser feita através de uma rede LAN convencional ou através de uma rede WiFi.

Um grupo de células pode ser agrupado para formar uma rede, sendo que as BS estão ligadas através da rede *core*. As redes IEEE 802.16 também suportam a



topologia *mesh*, em que as diversas SSs possuem a capacidade de comunicar entre si sem ter que recorrer necessariamente a uma BS. As redes do tipo *mesh* conferem à SS uma maior inteligência do que as redes sem fios tradicionais, uma vez que cada SS pode actuar como ponto de acesso e tem a capacidade de reencaminhar pacotes para os seus vizinhos, aumentando desta forma a cobertura geográfica da rede.

2.4. Camada PHY

A norma IEEE 802.16 suporta várias especificações físicas devido à sua natureza modular. A primeira versão apenas suportava a modulação *Single Carrier*. A partir daí foram incluídos OFDM e S-OFDMA para operar em ambientes NLOS, bem como permitir mobilidade. Para além disso, inicialmente eram suportadas bandas de 10-66GHz, tendo passado a ser também suportadas bandas inferiores a 11GHz.

2.4.1. Interfaces

Cada interface física tem uma designação específica, já que cada variante tem características bem definidas.

- **WirelessMAN-SC**

Trata-se de uma especificação definida para operar na banda de frequências 10-66GHz, utilizando modulação *single carrier*. Neste perfil cada modulação e esquema de codificação podem ser ajustados individualmente para cada SS. A norma suporta tanto *Frequency Division Duplexing (TDD)* como *Time Division Duplexing (FDD)* para distinguir *uplink* e *downlink*. Também suporta para as SS *half duplex FDD*, o que poderá ser mais económico na medida em que não transmitem e recebem em simultâneo. Esta técnica de duplexagem é comum a todas as especificações PHY. O acesso na direcção de *uplink* é feito por combinação de técnicas de *Time Division Multiple Access (TDMA)* e *Demand Assignment Multiple Access (DAMA)*, sendo então o *uplink* dividido em múltiplos *slots* de tempo. No caso de *downlink*, é utilizada uma arquitectura PTM usando *Time Division Multiplexing (TDM)*.

- **WirelessMAN-SCa**

Também se baseia na modulação *single carrier*, mas opera na banda de frequências de 2-11 GHz. O acesso é feito através de técnicas de TDMA, tanto em *uplink* como *downlink*, sendo também suportado TDM em *downlink*.

- WirelessMAN-OFDM

Baseia-se em *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) com uma transformada de 256 pontos para suportar múltiplas SS na banda de frequências de 2-11GHz. O acesso é feito através de TDMA.

- WirelessMAN-OFDMA

Esta especificação PHY usa *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) para fornecer BWA tanto fixo como móvel, na banda de frequências de 2-11GHz. O acesso múltiplo é feito pelo endereçamento de um subconjunto de múltiplas portadoras para receptores individuais.

- WirelessHUMAN

Esta especificação opera em bandas inferiores a 11 GHz. Tem como particularidade o facto de apenas suportar TDD como duplexagem.

	Banda de Frequências	Duplexagem	Observações
WirelessMAN-SC	10-66 GHz	TDD / FDD	Single Carrier
WirelessMAN-SCa	2-11 GHz (c/ Licença)	TDD / FDD	Single Carrier para NLOS
WirelessMAN-OFDM	2-11 GHz (c/ Licença)	TDD / FDD	OFDM para NLOS
WirelessMAN-OFDMA	2-11 GHz (c/ Licença)	TDD / FDD	OFDM dividido em grupos para fornecer acesso múltiplo numa única banda de frequências
WirelessHUMAN	2-11 GHz (c/ Licença)	TDD	Suporta <i>Single Carrier</i> , OFDM, OFDMA. Tem que possuir sistema de escolha dinâmica de frequência para

Tabela 2.2: Especificação da designação das interfaces IEEE 802.16

2.4.2. OFDM

Uma das principais características do canal rádio é o *multipath*: o sinal que chega ao receptor contém não só a onda directa que recebe em LOS, mas também recebe várias componentes resultantes de reflexões, cujo tempo de chegada é variável e impossível de prever. Os sinais atrasados são resultado de

reflexões que a onda sofre devido a vários obstáculos que encontra, como por exemplo árvores, montanhas, edifícios, automóveis, entre outros. Estas ondas “atrasadas” resultantes de reflexões, interferem com a onda directa e causam interferências entre símbolos (ISI), o que por sua vez degrada o sinal recebido, tendo consequências negativas na performance da rede. Assim, é necessário que uma rede *wireless* seja desenhada para minimizar estes efeitos adversos.

De forma a criar um sistema de comunicação de banda larga sem fios, é necessário usar uma transmissão de alto débito de vários megabits por segundo. No entanto, se os dados são transmitidos numa taxa de transferência de vários megabits por segundo, o tempo de atraso das ondas que chegam atrasadas é superior ao tempo de símbolo. Este problema pode ser solucionado através da utilização de equalizadores adaptativos. No entanto, isto alerta para as dificuldades enormes envolvidas na operação deste tipo de sinais, já que este tipo de operações envolve por si só a necessidade da utilização de *hardware* bastante dispendioso.

Para ultrapassar este desvanecimento provocado por *multipath* de forma menos complexa, surge a técnica OFDM, dado que se trata de um esquema de transmissão de dados que minimiza o efeito do *multipath*, evitando desta forma a utilização de meios complexos para o combater.

OFDM trata-se de um caso especial de transmissão multi-portadora, em que um único *stream* de dados é transmitido sobre um número de subportadoras de baixo nível. Assim, o OFDM pode ser visto tanto como uma técnica de modulação, como também uma técnica de multiplexagem. Traz inúmeras vantagens, entre as quais o aumento da robustez do sinal, ficando menos propenso a desvanecimento selectivo na frequência, ou interferências de banda estreita. Num sistema de *single carrier*, a transmissão está mais sujeita a interferências, podendo falhar facilmente, o que não acontece num sistema *multicarrier*, em que apenas uma pequena percentagem das subportadoras será afectada, cuja resolução poderá passar pela utilização de um algoritmo de correcção de erros.

Num sistema clássico de dados em paralelo, a banda de frequência do sinal é dividida na totalidade em N subcanais em frequência. Cada um deles é modulado com um símbolo diferente, e os N subcanais são multiplexados em frequência,

sem existir sobreposição. Para lidar com a ineficiência, foram introduzidas técnicas com o objectivo de utilizar dados paralelos e FDM com sobreposição de subcanais em que o espaçamento entre subcanais é igual à taxa de transmissão, de forma a evitar os problemas aos quais a anterior técnica estava sujeita e também de forma a utilizar toda a largura de banda de forma mais eficiente. No entanto, para que esta técnica seja eficiente, é necessário garantir ortogonalidade entre as diferentes portadoras moduladas.

A palavra “ortogonal” indica que existe uma relação matemática precisa entre as frequências das portadoras no sistema. Num sistema normal FDM, muitas das portadoras estão de tal forma separadas que os sinais podem ser recebidos utilizando filtros e desmoduladores convencionais. Nestes receptores, são introduzidas bandas de guarda entre as diferentes portadoras e no domínio da frequência, resultando assim numa redução de eficiência espectral.

É possível, no entanto, colocar as portadoras num sinal OFDM de forma a que as portadoras individuais se sobreponham e os sinais sejam ainda recebidos sem interferências provocadas por portadoras adjacentes. Para tal, as portadoras têm que ser matematicamente ortogonais. O receptor age como um banco de desmoduladores, em que cada portadora é traduzida para DC, em que o sinal resultante é integrado sobre um período de símbolo para recuperar os dados originais. Assim, se as portadoras forem espaçadas de um múltiplo de $1/T$, estas são linearmente independentes, ou seja, são ortogonais.

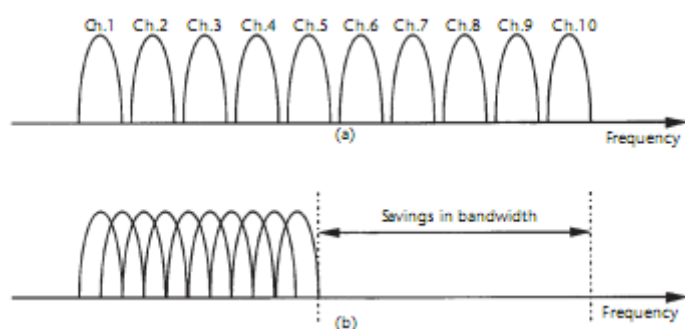


Fig.2.3 – Conceito do sinal OFDM: (a) técnica multi-portadora convencional; (b) técnica de modulação ortogonal

Para aumentar a eficiência do processo de modulação e desmodulação, bem como diminuir o custo adjacente ao mesmo, foram introduzidas alterações a este processo. Passou a ser aplicada a transformada discreta de Fourier (DFT). O uso de DFT permite o cálculo de valores de correlação no centro da frequência de cada subportadora, permitindo a recuperação dos dados sem interferências.

Assim, o FDM é conseguido por processamento de banda base em detrimento de filtragem passa-banda, facilitando assim a computação do processo.

O esquema de transmissão OFDM tem várias vantagens chave, das quais se destaca:

- Trata-se de um modo eficiente de lidar com *multipath*, já que reduz em muito a complexidade de implementação em relação a um sistema *single carrier* com um equalizador.
- Em canais com reduzidas variações no tempo, é possível melhorar a capacidade de forma significativa, adaptando a taxa de transmissão de dados para cada subportadora de acordo com a relação SNR dessa subportadora em particular.
- OFDM é robusto contra interferências de banda estreita, já que apenas afectam uma pequena percentagem de subportadoras

Por outro lado, existe também o reverso da medalha, já que o OFDM apresenta algumas desvantagens:

- É mais sensível a ruído e distorção na frequência obrigando, por isso, a grande exactidão na sincronização da frequência.
- Tem uma potência de pico relativamente elevada, o que poderá reduzir a eficiência de um amplificador RF.

2.4.3. Capacidade de um Sistema OFDM

Antes de passar à fase de planear uma rede WiMAX, é necessário compreender qual a capacidade que é possível disponibilizar aos seus utilizadores.

A capacidade reflecte-se directamente no número de ligações que o canal *wireless* pode suportar sem que haja degradação dos serviços de dados do mesmo. A capacidade é influenciada por variados factores, que poderão ser ambientais, dependentes da configuração usada (Largura de Banda do canal) e natureza do tráfego que percorre o sistema. É, então, bastante importante compreender todos estes factores e compreender a camada física da norma IEEE 802.16 para perceber quais as implicações da mesma na obtenção da capacidade total.

Para, então, se compreender a capacidade total de um sistema WiMAX começa por ser necessário saber qual o espectro rádio disponível. Este restringe o tamanho dos canais em largura de banda de frequência, o que por si só já restringe a capacidade “bruta” do canal.

Tal como já visto anteriormente, em OFDM o espectro disponível é dividido em vários canais discretos de banda estreita, subportadoras, sendo que cada portadora é modulada sobre um tempo de símbolo que é inversamente proporcional à frequência da portadora, de forma a que as subportadoras tenham mínimas interferências mútuas entre si. A capacidade de cada subportadora depende da modulação, que é de 1 bit por subportadora para o caso de BPSK, 2 bits por subportadora para o caso de QPSK, 4 bits por subportadora para o caso de 16-QAM e 6 bits por subportadora para 64-QAM. Na OFDM-PHY estão definidas 256 subportadoras, definindo então o espectro de amostragem como

$$F_s = FLOOR\left(n \frac{BW}{8000}\right) * 8000, \text{ sendo } n \text{ o factor de amostragem e } BW \text{ o tamanho do}$$

canal em Hz. Através do espectro de amostragem sabe-se qual o espaçamento que as 256 subportadoras guardam entre cada, através de $\Delta f = F_s/256$. No entanto nem todas as 256 subportadoras são usadas, porque há necessidade de fornecer robustez a interferências entre canais facilitando também, por outro lado, a filtragem. Assim, há 28 subportadoras de guarda inferiores, 27 superiores e uma DC, o que significa que apenas 200 subportadoras são usadas efectivamente. Resta por fim descontar mais 8 subportadoras piloto cuja função é de estimação de canal. Então, restam 192 subportadoras que efectivamente transportam informação. Para calcular a capacidade “bruta” do canal há alguns parâmetros que são necessários:

Parâmetro	Obs.
$T_b = 1/\Delta f$	Tamanho de símbolo útil
$T_s = T_b + G.T_b$	Tamanho de símbolo efectivo; $G = \frac{1}{2^m}$, com $m=\{2,3,4,5\}$

Tabela 2.3 – Cálculo do tempo de símbolo

A capacidade “bruta” do canal é então dada por $C_{bruta} = 192 \frac{k}{T_s}$, em que k é o número de bits por símbolo para a modulação usada. Como é previsível que um sistema *wireless* encontre erros ocasionais introduzidos por transmissões/detecções imperfeitas, são enviados bits redundantes para facilitar a

detecção e correcção de erros. A técnica usada é a *Forward Error Correction* (FEC), que reduz a capacidade do canal. A norma IEEE 802.16 fornece a tabela 2.4, que por sua vez fornece os parâmetros que restam para calcular a capacidade útil do canal. O parâmetro “*Coded Block Size*” ajusta as taxas de modulação de forma a que os blocos codificados através da técnica FEC encaixem perfeitamente no tempo de símbolo quando as 192 subportadoras estão em uso.

Modulation	Uncoded Block Size (bytes)	Coded Block Size	Overall Coding Rate
BPSK	12	24	$\frac{1}{2}$
QPSK	24	48	$\frac{1}{2}$
QPSK	36	48	$\frac{3}{4}$
16-QAM	48	96	$\frac{1}{2}$
16-QAM	72	96	$\frac{3}{4}$
64-QAM	96	144	$\frac{2}{3}$
64-QAM	108	144	$\frac{3}{4}$

Tabela 2.4 – Codificação do canal para cada modulação

A capacidade útil por símbolo é, então, $C = C_{bruta} \cdot OCR$. Estão então reunidas as condições para efectuar o cálculo da capacidade, para os diferentes tamanhos de canal.

Modulação/BW (MHz)	Capacidade (Mbps)					
	3,5 MHz	5 MHz	7 MHz	10 MHz	14 MHz	20 MHz
BPSK 1/2	1,45	2,08	2,91	4,16	5,82	8,31
QPSK 1/2	2,91	4,16	5,82	8,31	11,64	16,62
QPSK 3/4	4,36	6,23	8,73	12,47	17,45	24,94
16-QAM 1/2	5,82	8,31	11,64	16,62	23,27	33,25
16-QAM 3/4	8,73	12,47	17,45	24,94	34,91	49,87
64-QAM 2/3	11,64	16,62	23,27	33,25	46,55	66,49
64-QAM 3/4	13,09	18,7	26,18	37,4	52,36	74,81

Tabela 2.5 – Valores de capacidade útil calculados

2.5. Camada MAC

A camada de controlo de acesso ao meio (MAC) de qualquer sistema de comunicações normalmente descreve ou especifica os parâmetros de composição de mensagens e transmissão, fornecimento de serviços, alocação de recursos, suporte de QoS e manutenção da ligação. Está intimamente ligada à

topologia do sistema WiMAX, que poderá ser PMP e *Mesh*, tal como já foi referido anteriormente.

A informação de alocação dos recursos é feita através das mensagens MAP (Media Access Protocol) por intermédio do escalonador MAC. Cada ligação é identificada por um CID (*Connection Identifier*), que serve como um endereço temporário para transmissões de dados sobre uma determinada ligação.

No modo de operação PMP, quando a mensagem *Downlink MAP* (DL-MAP) não especifica explicitamente que determinada porção da *subframe* é para uma SS específica, todas as SS poderão escutar essa porção. As SS verificam os identificadores de ligação (CID) no *Protocol Data Unit* (PDU) recebido e retêm apenas aqueles que lhe são endereçadas. As SS partilham o *uplink* para a BS consoante a necessidade. Dependendo da classe de serviço na SS, a esta podem-lhe ser garantidos direitos de transmissão pela BS após esta receber os respectivos pedidos. Para além das mensagens endereçadas individualmente, estas também podem ser enviadas por *multicast* para um grupo de SS. Em cada sector as SS são controladas pelo protocolo de transmissão ao nível da camada MAC, sendo-lhes permitido receber serviços com requisitos ao nível de atrasos e largura de banda para cada aplicação. O esquema de transmissão é orientado à ligação, sendo que todas as transmissões de dados estão definidas no contexto da mesma. Os fluxos de serviço podem ser fornecidos numa SS e as conexões são associadas com estes fluxos de serviço, sendo que cada um serve para fornecer serviço de transmissão a uma largura de banda requisitada para a ligação.

No modo de operação *Mesh*, nenhum nó consegue transmitir sem ter que ser coordenado com outros nós. Através de escalonamento distributivo todos os nós devem coordenar as suas transmissões na respectiva vizinhança e devem fazer *broadcast* dos seus *schedules* para todos os seus vizinhos. Opcionalmente, o escalonamento pode ser estabelecido directamente com pedidos directos não coordenados entre 2 nós, que devem garantir que as transmissões resultantes não irão causar colisões com os dados e também controlo de tráfego de outro nó na vizinhança. Não há diferença no mecanismo para determinar o escalonamento para *downlink* e *uplink*. Através de escalonamento centralizado, os recursos são garantidos de uma forma mais centralizada, já que a *Mesh BS* deve reunir os

pedidos de recursos de todas as SS num alcance de determinado número de saltos. Isso irá determinar a quantidade de recursos garantidos para cada ligação na rede, tanto em *downlink* como em *uplink*, sendo que esta informação será fornecida a todas as SS dentro do alcance. Todas as comunicações são feitas num contexto de ligação, que é estabelecida entre dois nós.

2.5.1. QoS e Classes de Serviço

Qualidade de serviço (QoS) permite garantir um determinado desempenho ao nível de serviços para um fluxo de dados proveniente de uma fonte, tendo um destino específico. A necessidade de QoS surge quando há múltiplos fluxos de dados competindo pela capacidade física limitada de uma determinada transmissão.

No caso do WiMAX, a limitação imposta é a largura de banda da radiofrequência. Quando há múltiplos fluxos de dados competindo pela mesma frequência de largura de banda, é necessária uma política de QoS para determinar qual o fluxo que terá prioridade de uso da interface. Esta política depende das aplicações do utilizador que estão caracterizadas por parâmetros de desempenho de QoS. Por exemplo, uma aplicação de VoIP necessita de garantia de baixa latência, ou uma transmissão de vídeo necessita de elevada largura de banda apesar de poder suportar um atraso relativamente grande, ou uma aplicação de e-mail não necessita de nenhuma garantia além da fiabilidade na entrega dos dados.

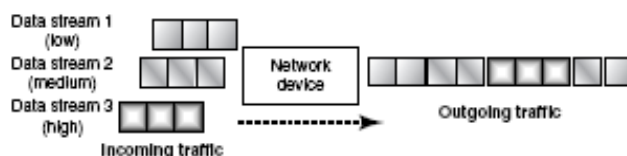


Fig.2.4 – A necessidade de QoS

Há vários conceitos relacionados com QoS definidos nas normas IEEE 802.16. O mecanismo principal para fornecer QoS trata-se de associar pacotes que atravessam a interface MAC num fluxo de serviço identificado pelo respectivo CID. Um fluxo de serviço neste contexto é um fluxo unidireccional de pacotes ao qual é atribuída uma determinada QoS. A SS e BS fornecem esta QoS de acordo com parâmetros definidos para o fluxo de serviço. Os fluxos de serviço existem tanto na direcção de *uplink* como na de *downlink* e podem existir sem terem de

facto sido activados para transportar tráfego. Todos os fluxos de serviço têm um *Service Flow Identifier* (SFID) de 32-bit; os fluxos de serviço activos e admitidos também têm um CID de 16-bit.

O objectivo principal das características de QoS é ordenar e escalonar a transmissão na interface sem fios. No entanto, estas características muitas vezes precisam de trabalhar em conjunto com mecanismos fora da interface sem fios para fornecer QoS fim-a-fim, ou para controlar o comportamento das SS. Assim, os requisitos-chave para QoS são:

- Uma função de registo e configuração para pré-configurar os fluxos de serviço e parâmetros de tráfego baseados em SS.
- Uma função de sinalização para estabelecer dinamicamente os fluxos de serviço e parâmetros de tráfego, com QoS activa.
- Utilização de escalonamento MAC e parâmetros de tráfego com QoS para fluxos de serviço no serviço *uplink*.
- Utilização de parâmetros de tráfego com QoS para fluxos de serviço *downlink*
- Agrupamento de propriedades de fluxo de serviço nas denominadas classes de serviço, de forma a que as entidades de camadas superiores e aplicações externas (tanto na SS como BS) possam fazer pedidos de fluxos de serviço com os parâmetros de QoS necessários numa forma globalmente consistente.

O fluxo de serviço possui características específicas, que são definidas por um conjunto de parâmetros QoS como latência, *jitter* e *throughput*. Para normalizar a operação entre SS e BS, estes atributos incluem detalhes acerca de como a SS requisita alocações de largura de banda para *uplink* e acerca do comportamento esperado do escalonador da BS.

Para utilizar recursos de rede como largura de banda e memória de forma eficiente, a norma IEEE802.16 adopta um modelo de activação de 2 fases, em que os recursos atribuídos a determinado fluxo de serviço admitido podem não ser de facto utilizados até que o fluxo de serviço seja activo. Cada fluxo de serviço admitido ou activo é mapeado para uma ligação através de uma mensagem Medium Access Protocol (MAP) com um único CID. De forma geral, há três tipos básicos de fluxos de serviço, nomeadamente

- Fluxos de serviço provisionados: estes fluxos de serviço não são imediatamente activados. A rede atribui um SFID para este fluxo de serviço.
- Fluxos de serviço admitidos: suporta um modelo de duas fases que é semelhante ao utilizado muitas vezes em aplicações de telefonia. Os recursos primeiro são “admitidos” e apenas são activados quando a negociação fim-a-fim termina. Através deste modelo é possível conservar recursos de rede até que a ligação seja estabelecida.
- Fluxos de serviço activos: após a segunda fase do modelo de activação, os fluxos de serviço dizem-se “activos”.

Tal como já foi referido, os parâmetros de QoS incluem-se numa grande variedade, que podem incluir prioridade de tráfego, maior taxa de transmissão suportada, taxa mínima tolerável, tipo de escalonamento, atraso máximo, *jitter* tolerado, entre muitos outros. Os fluxos de serviço podem ser fornecidos através de um sistema de gestão de rede ou podem ser criados dinamicamente através de mecanismos de sinalização devidamente definidos na norma. O WiMAX define 5 tipos de fluxo de serviço em particular, que são:

- Unsolicited Grant Service (UGS): Suporta pacotes de dados de tamanho fixo a uma taxa constante (CBR). Este serviço serve, por exemplo, para transmitir voz não comprimida emulando assim a comunicação baseada em comutação de circuitos. Este serviço requer um intervalo de tempo fixo e garante a taxa de transmissão e atraso para o serviço.
- Real-time Polling Service (rtPS): Este serviço suporta fluxos de serviço em tempo-real, como vídeo MPEG, em que o tamanho dos pacotes é variável, bem como a sua periodicidade. Assim, a largura de banda necessária pode variar a cada instante. Este serviço requer a implementação por parte da BS de um mecanismo de polling para a SS num intervalo fixo, para ir actualizando o requisito de largura de banda para cada intervalo de tempo
- Extended Real-time Polling Service (ertPS): Este serviço foi definido apenas na norma IEEE802.16e (WiMAX móvel) para suportar fluxos de

serviço em tempo-real que geram pacotes de dados variáveis de forma periódica, como o serviço de VoIP com supressão de silêncio. De forma adicional, o ertPS constrói-se da eficiência tanto do UGS como rtPS, ou seja, a BS fornece grants unicast de forma não solicitada como em UGS, no sentido de poupar na latência de um pedido de largura de banda. No entanto, as alocações UGS são fixas em tamanho, o que não acontece neste caso.

- Non-real-time Polling Service (nrtPS): Este serviço é indicado para aplicações que não sejam de tempo-real que necessitem de garantia de performance. É necessário que a BS faça polling à SS num intervalo de tempo fixo, mas que não é um intervalo tão rígido como no caso de rtPS. Se uma SS não responde ao polling após n vezes, a BS coloca a SS em espera. Um exemplo de uma aplicação deste serviço é o FTP.
- Best Effort Service (BE): Este serviço não necessita de polling. É indicado para suportar fluxos de dados que não necessitem de um determinado mínimo de garantia ao nível do serviço. Um exemplo de uma aplicação deste serviço é o web browsing.

2.6. Segurança no WiMAX

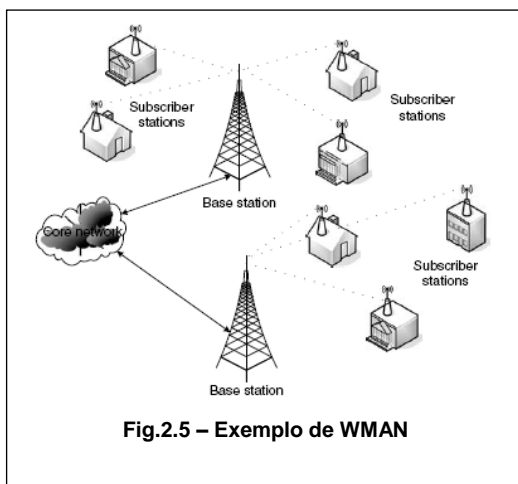
A segurança em WiMAX tem 2 objectivos, em que um é fornecer privacidade através da rede wireless e o outro é fornecer controlo de acesso à rede.

A privacidade é conseguida encriptando as ligações entre a SS e a BS. A BS protege contra acesso não autorizado ao forçar encriptação de fluxos de serviço através da rede. Um protocolo de *Privacy and Key Management* versão 2 (PKMv2) é utilizado pela BS para controlar a distribuição de dados da chave para a SS. Isto permite que a SS sincronize com a BS e assim envie dados da chave. Para além disto, os dados do utilizador são encriptados usando métodos comprovadamente robustos para fornecer privacidade, que são métodos de AES (*Advanced Encryption Standard*). A autenticação entre dispositivo e utilizador é suportada usando o protocolo IETF EAP. Para além disto há protecção das mensagens de controlo e suporte para rápido (e seguro) handover.

2.7. Aplicações do WiMAX

2.7.1. WMAN

O WiMAX, tal como foi referido anteriormente, é uma tecnologia WMAN, tratando-se, assim, de uma tecnologia de rede sem fios cujo alcance e cobertura poderão abranger desde alguns blocos de edifícios cidades na sua totalidade potencial desta tecnologia para fornecer largura de banda sem fios é, de facto, um dos seus grandes atractivos. As WMANs supostamente irão fornecer serviços de largura de banda sem fios a baixos custos mas com capacidade equivalente ou superior às soluções *wired* existentes no mercado. Existe sempre a vantagem de uma ligação *wireless* em relação à ligação *wired* na medida em que esta poderá sofrer problemas relacionados com a qualidade do fio, ou problemas devidos à elevada concentração de utilizadores cujas resoluções implicam uma solução dispendiosa.



Uma WMAN baseada em WiMAX usa tipicamente arquitecturas PMP para fornecer serviços de banda larga, como *Internet* rápida ou aplicações multimédia num raio de vários quilómetros. O alcance de uma rede WMAN é determinado pela frequência de largura de banda disponível, potência de transmissão e sensibilidade do receptor. Numa rede WMAN, cada BS está

ligado a um grupo de utilizadores num cenário NLOS com ligações PMP, enquanto as BS estão tipicamente ligadas à rede *core* através de fibra a nós disponíveis ou através de ligações Ponto-a-Ponto por micro-ondas.

2.7.2. Acesso à Banda Larga em Áreas Rurais

Um dos desafios para os provedores de serviços actuais é o fornecimento de serviços em áreas rurais. Isto deve-se ao facto de ser impensável chegar a estas zonas por intermédio de fios, já que a qualidade da banda larga nestes casos depende de vários factores, desde a qualidade da rede de acesso, a ligação entre o ponto de acesso local e a rede *backhaul* e, principalmente, a distância compreendida entre ambos. Assim, para áreas rurais não se trata de uma solução

viável: é muito dispendioso, remoto e seria um processo muito moroso. Os satélites também se podiam apresentar como uma solução viável para servir estas áreas, no entanto têm bastantes desvantagens na medida em que têm uma largura de banda de *upstream* bastante limitada, indisponibilidade de espectro e elevados tempos de atraso.

Desta forma, o WiMAX é uma das melhores soluções para servir estas áreas já que é de baixo custo (no que diz respeito à implementação e também a custos posteriores) e de fácil implementação, mas com desempenhos similares às tecnologias DSL ou Cabo. Para além disso, o WiMAX é altamente escalável, na medida em que o custo de se adicionar uma nova célula é substancialmente inferior a fazê-lo numa rede *wired*.

Nestas zonas também poderá haver pequenas/médias empresas, que poderão beneficiar com esta tecnologia, já que esta poderá ajudar a reduzir custos.

2.7.3. Outras aplicações

- Acesso de alta velocidade a prédios

Esta aplicação vem ao encontro de problemas existentes actualmente pelas tecnologias actuais ao fornecer banda larga a prédios, como por exemplo a utilizadores residenciais, escritórios de pequenas e médias empresas, campus ou hospitais. Os problemas podem ser tipicamente de implementação, já que se pode tornar um processo muito lento. O uso de WiMAX vem fornecer este serviço de forma mais flexível e com custo mais baixo, com desempenhos comparáveis.

- *Backhaul*

O WiMAX pode ser usado para fornecer *backhaul* de alta capacidade para servir múltiplas células e assim permitir a expansão para serviços móveis com um custo mais baixo do que seria a implementação “terrestre”. Para além dos sistemas celulares, há mais aplicações possíveis, como por exemplo o backhaul para *hot spots* de Wi-Fi. Estas soluções são feitas normalmente em cenários de ligações Ponto-a-Ponto, em LOS, para maximizar o desempenho destas conexões (também podem ser usados em conjugação com ligações PMP para oferecer mais serviços).

- Ligações privadas entre empresas

O WiMAX pode ser usado por empresas ou redes privadas para fornecer ligação de escritórios remotos a escritórios centrais. O WiMAX fornece ligações seguras, fiáveis e de alta velocidade. Esta aplicação pode servir não só empresas mas outras áreas como ligações governamentais, educação, saúde ou organizações públicas.

- Sistemas de Vídeo-vigilância sem fios

Esta aplicação combina tecnologias WiMAX com IP e fornece soluções de monitorização de localizações críticas com segurança, flexibilidade e um bom binómio qualidade/custo. Há vários exemplos de aplicações, sejam eles monitorização de zonas susceptíveis a incêndios, cheias, elevado trânsito, ou segurança em lojas, armazéns, bases militares, entre muitos outros.

- Outras aplicações:

- Instalação de equipamentos de caixas automáticas Multibanco em zonas rurais.
- *Online Gaming*
- Comunicação multimédia
- Aplicações médicas (Como monitorização de sinais vitais de um paciente de forma remota)
- Voz e dados a uma velocidade veicular
- Redes de sensores

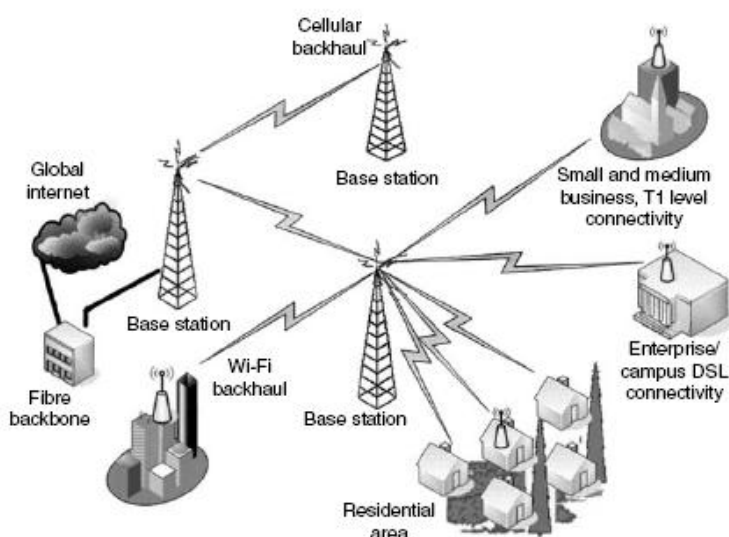


Fig.2.6 – Aplicações Várias do WiMAX

2.8. Sumário

O capítulo 2 apresentou uma introdução ao assunto da dissertação, focando-se no estudo da norma IEEE802.16. Foi, portanto, dada uma abordagem marcadamente mais teórica, em que foram mencionados tanto aspectos históricos, como aspectos relacionados com o funcionamento da tecnologia de acordo com a norma. Em relação a aspectos físicos, foi estudada a capacidade do sistema OFDM, algo que é fundamental para planejar estas redes sem fios. Por fim, é de destacar as várias aplicações do WiMAX que foram apresentadas, levantando o véu para o enorme potencial que poderá advir da implementação desta tecnologia num futuro próximo.

3. Mobilidade

A mobilidade é um dos principais desafios actuais do mundo das telecomunicações. A tecnologia que permitir mobilidade total será concerteza bastante bem sucedida e aceite pelos utilizadores finais. Inicialmente, o WiMAX fora concebido para oferecer apenas serviço fixo ou, no máximo, nómada. Após a introdução da norma IEEE 802.16e a mobilidade passou a ser suportada pelo WiMAX.

Este capítulo surge como uma introdução ao assunto da mobilidade. Trata-se de um assunto que não foi estudado com afinco no âmbito desta dissertação, mas que merece no entanto atenção, uma vez que é um aspecto bastante importante que o WiMAX vai introduzir.

Inicialmente vai haver uma introdução à mobilidade e ao OFDMA. De seguida, aborda-se *subchannelization* (Secção 3.1), que se trata de uma das introduções do WiMAX móvel. Tal como no capítulo anterior, agora é feito um estudo ao nível da capacidade do WiMAX móvel, estudando pormenorizadamente como funciona um sistema S-OFDMA, na secção 3.2. De seguida, na secção 3.3, são mostradas diversas alternativas tecnológicas, ao nível de melhoria do desempenho das antenas. Por fim, são apresentados alguns dos aspectos que passaram a fazer parte do vocabulário WiMAX, após a introdução da mobilidade (Secção 3.4).

A tecnologia WiMAX tem como um dos objectivos fornecer aos seus utilizadores mobilidade total. Inicialmente, a norma IEEE 802.16-2004 apenas contemplava a vertente fixa do WiMAX, através do uso de OFDM. Já a norma IEEE 802.16e engloba também a possibilidade de WiMAX móvel. Para isso introduz-se o uso de OFDMA e S-OFDMA. A partir de agora surgem novos conceitos na tecnologia, tais como *roaming* e *handoff*.

O conceito de mobilidade poderá ser abrangente, na medida em que poderá englobar quatro cenários distintos:

- Nómada: Capacidade de transportar um aparelho de WiMAX fixo e ligá-lo num local distinto.
- Portabilidade: Aplicação de acesso do mesmo tipo que o anterior, mas com a particularidade de ser em aparelhos portáteis.

- Mobilidade Simples: Capacidade da estação móvel (MS) se mover a velocidades relativamente baixas, com pequenas interrupções durante os processos de *handover*.
- Mobilidade total: Capacidade da MS se movimentar a velocidades veiculares sem com isso perder a conectividade.

A técnica OFDMA é utilizada no WiMAX móvel. A transmissão OFDM foi originalmente desenhada para a transmissão de um único sinal. Assim, de modo a poder haver múltiplas transmissões por parte de múltiplos utilizadores, teve que ser associado ao OFDM uma técnica de acesso múltiplo como TDMA ou FDMA, aparecendo então OFDMA. No entanto, o acesso múltiplo não é a única adição à tecnologia. Também foi introduzida a escalabilidade na transmissão. A escalabilidade permite a alteração no tamanho da FFT e assim no número de subportadoras.

OFDMA torna possível *subchannelization* tanto em *uplink* como em *downlink*, sendo que os subcanais formam a frequência mínima de recursos alocados pela BS, possibilitando desta forma que diferentes subcanais sejam alocados a diferentes utilizadores como um mecanismo de acesso múltiplo. É a este esquema que se designa de OFDMA. Os subcanais podem ser constituídos quer pelo uso de *subcarriers* contíguos como o uso de *subcarriers* distribuídos de forma pseudo-aleatória, espalhados pelo espectro de frequência. Os subcanais formados utilizando subportadoras distribuídas fornecem maior diversidade na frequência, o que é particularmente útil para aplicações móveis.

O WiMAX define vários esquemas de *subchannelization* que se baseiam em portadoras distribuídas por *uplink* e *downlink*. Este assunto será tratado mais à frente, na secção 3.1.

No WiMAX móvel, o tamanho da FFT é escalável de 128 até 2048. Assim, para aumentos de largura de banda disponível, também se verifica o aumento das dimensões da FFT, de forma a que o espaçamento entre subportadoras se mantenha constante, o que permite então que a escalabilidade tenha um impacto mínimo nas camadas superiores, para além de manter um design de baixo custo. A escolha deste valor de espaçamento (10.94KHz) deve-se ao facto de possuir um bom binómio entre requisitos básicos para operação em ambientes fixos e

móveis, que são eles o *delay spread* e o *Doppler spread*. No que diz respeito ao primeiro, este espaçamento permite até 20 μ s, bom como uma velocidade veicular que pode atingir aproximadamente 120 Km/h, numa frequência de operação de 3.5 GHz. Os perfis existentes no OFDMA-PHY implicam o uso de FFT de 128, 512, 1024 e 2048 em larguras de banda de, respectivamente, 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz e 20 MHz.

3.1. Subchannelization

As subportadoras disponíveis podem ser divididas em vários grupos de sub-canais. WiMAX fixo baseado em OFDM-PHY permite esta técnica de implementação de sub-canais numa forma limitada, na medida em que apenas o permite para o *uplink*. A norma define 16 subcanais, em que 1, 2, 4, 8 ou a totalidade dos conjuntos podem ser atribuídos a um SS no *uplink*. Isto vai permitir que o SS transmita usando apenas uma fracção da largura de banda que lhe foi atribuída pela BS, o que irá resultar em melhorias que poderão contribuir tanto para uma melhor gestão de tempo de bateria por parte do SS como também para uma melhor performance ao nível do alcance atingido. A fracção da largura de banda utilizada poderá ser tão baixa como 1/16 o que por si só já iria resultar numa melhoria de 12 dB no sinal enviado pelo SS.

Já no caso do WiMAX móvel, que se baseia em OFDMA-PHY, por outro lado, é permitido *subchannelization* também no *downlink* e, neste caso, os subcanais formam o recurso mínimo de alocação de frequência por parte da BS. Desta forma, subcanais podem ser atribuídos a utilizadores diferentes como um mecanismo de acesso múltiplo. É a este esquema de acesso múltiplo que se denomina OFDMA. Os subcanais podem ser constituídos quer por subportadoras contíguas como também podem ser distribuídas de forma pseudo-aleatória através do espectro disponível. A formação de subcanais fornece uma maior diversidade na frequência, o que é útil na de forma particular em implementações de WiMAX móvel. A norma define vários esquemas de *subchannelization* que se baseiam na distribuição das subportadoras tanto para *uplink* como *downlink*. Um desses esquemas denomina-se *Partial Usage of SubCarriers* (PUSC) e é obrigatório para todas as implementações de WiMAX móvel. A título de exemplo,

é de referir que os perfis de WiMAX definem 15 e 17 subcanais para *downlink* e *uplink*, respectivamente, para operação PUSC na banda dos 5 MHz.

Já o esquema de *subchannelization* baseado em subportadoras contíguas é denominado de AMC (*Adaptive Modulation and Coding*). Apesar de abdicar da diversidade na frequência, este esquema permite que se explore diversidade multi-utilizador, alocando sub-canais aos utilizadores baseando-se na sua resposta em frequência. A diversidade multi-utilizador pode fornecer ganhos significativos na capacidade geral do sistema, já que o sistema irá fornecer a cada utilizador o subcanal com melhores características em termos de relação entre sinal, interferência e ruído. É, portanto, um esquema mais vocacionado para implementações fixas ou de baixa mobilidade.

3.2. Capacidade de um Sistema S-OFDMA

Existem 4 perfis definidos para WiMAX móvel, para as frequências de 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz e 20 MHz. Para cada um dos perfis existe um tamanho de FFT próprio. Portanto, é interessante verificar os parâmetros de escalabilidade S-OFDMA.

Parâmetros de Escalabilidade OFDMA				
Frequência [MHz]	1,25	5	10	20
Freq. Amostragem [MHz]	1,4	5,6	11,2	22,4
Tamanho FFT	128	512	1024	2048
Nr. Subportadoras	2	8	16	32
Espaçamento Δf (KHz)	10,94	10,94	10,94	10,94
Tempo útil símbolo T_b (μs)	91,41	91,41	91,41	91,41
Tempo de guarda T_g (μs)	11,43	11,43	11,43	11,43
Duração símbolo OFDMA T_s (μs)	102,83	102,83	102,83	102,83
Número de símbolos numa trama OFDMA (5ms)	48	48	48	48

Tabela 3.1 – Parâmetros de escalabilidade OFDMA, para cada perfil de WiMAX móvel

Apesar do tamanho da FFT variar com o tamanho dos canais, o impacto é mínimo, já que o espaçamento mantém-se constante.

Como já foi referido, o uso de PUSC é obrigatório em WiMAX móvel. Como tal é interessante estudar a capacidade de um sistema S-OFDMA com implementação PUSC. Para tal, é necessário compreender como funciona a alocação dos símbolos numa *frame*. O funcionamento para UL e DL é diferente.

No caso do DL, as subportadoras estão divididas em 6 grupos e só alguns podem ser usados num sector ou célula. Para além disso os dados e os pilotos estão organizados em *clusters* de 14 subportadoras, em 2 símbolos. Os *clusters*, por sua vez, dividem-se em 6 grupos, sendo que 2 *clusters* do mesmo grupo formam um *subchannel*. É possível, por exemplo, numa célula sectorizada, atribuir alguns dos grupos a cada sector numa célula – por exemplo 2 grupos a cada sector. A figura 3.1 esquematiza o funcionamento de PUSC DL.

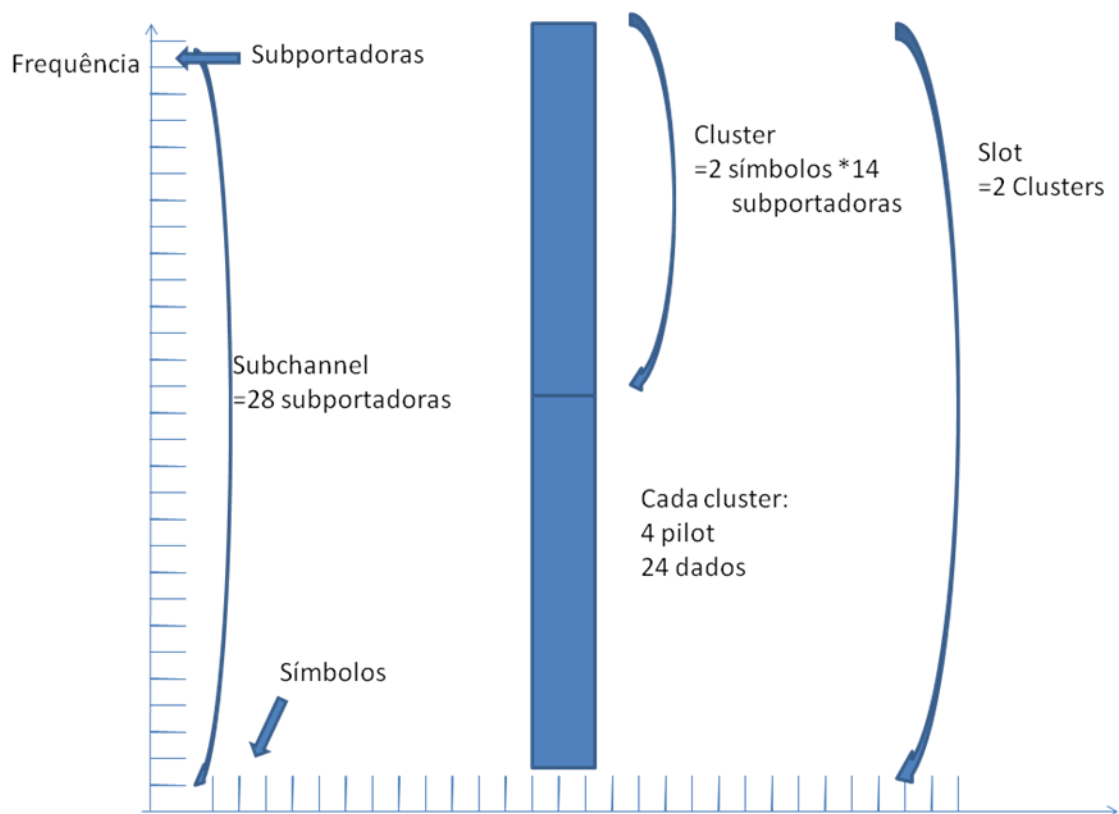


Fig.3.1 – Downlink em PUSC

No caso do *Uplink*, em vez de *cluster*, os dados e pilotos estão organizados em *Tiles*, de 4 subportadoras e 3 símbolos. Aqui, um *subcanal* é formado por 6 *Tiles*. A figura 3.2 esquematiza este tipo de organização.

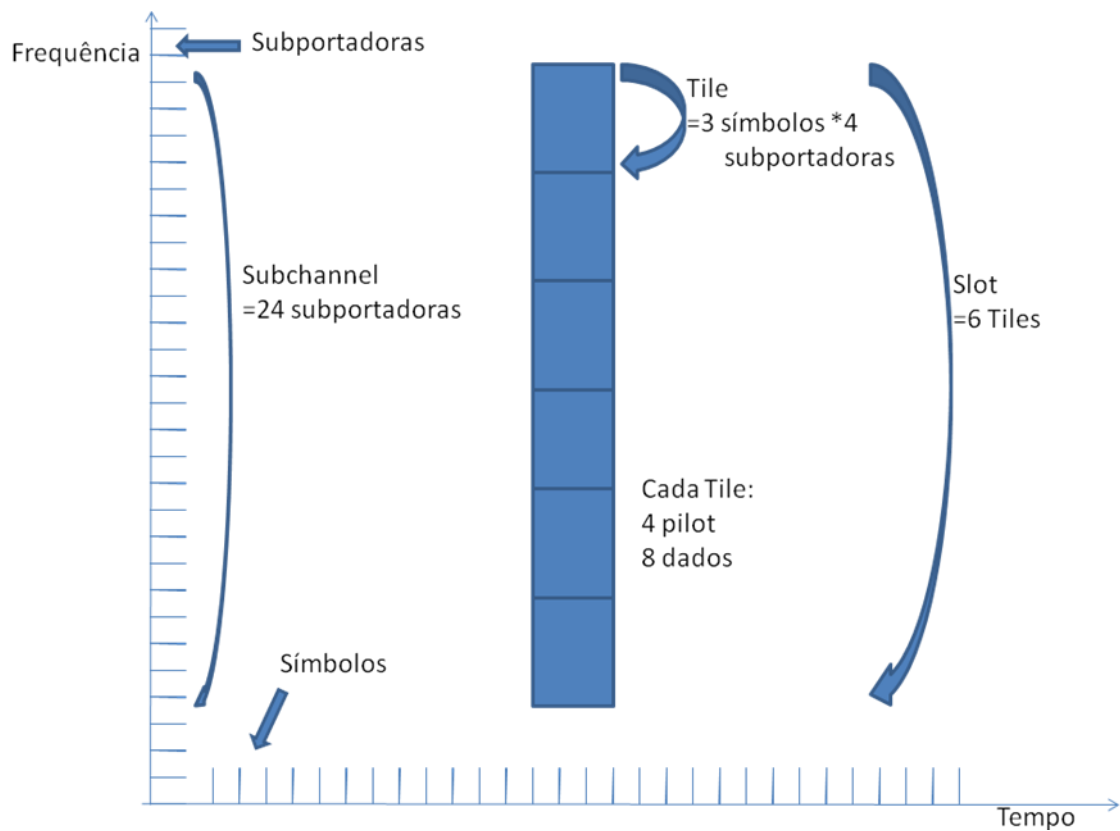


Fig.3.2 – Uplink em PUSC

Compreendendo agora estes esquemas, já é possível calcular a capacidade útil para cada modulação, com PUSC. Faz todo o sentido separar a capacidade, em *downlink* e *uplink*.

Cálculo da capacidade DL (PUSC)				
Subcarrier/cluster	14	14	14	14
Nr sub	3	15	30	60
Cluster/subchannel	2	2	2	2
Data	96	360	720	1440
Pilot	12	60	120	240
Guard	16	91	183	369
DC	1	1	1	1
Free Slots/frame	21	105	210	420
Bytes por slot				
QPSK 1/2	6	6	6	6
QPSK 2/3	9	9	9	9
16-QAM 1/2	12	12	12	12
16-QAM 3/4	18	18	18	18
64-QAM 2/3	24	24	24	24
64-QAM 3/4	27	27	27	27
Capacidade (Mbps)				
QPSK 1/2	0,2016	1,0080	2,0160	4,0320
QPSK 2/3	0,3024	1,5120	3,0240	6,0480
16-QAM 1/2	0,4032	2,0160	4,0320	8,0640
16-QAM 3/4	0,6048	3,0240	6,0480	12,0960
64-QAM 2/3	0,8064	4,0320	8,0640	16,1280
64-QAM 3/4	0,9072	4,5360	9,0720	18,1440

Tabela 3.2 – Capacidade útil para cada modulação, em *downlink* PUSC

Na tabela 3.2 é apresentado o cálculo para a capacidade útil para cada modulação, em *downlink*. Os cálculos para o caso do *uplink* são apresentados na tabela 3.3.

Cálculo da capacidade UL (PUSC)				
Subcarrier/cluster	4	4	4	4
Nr sub	4	17	35	92
Cluster/subchannel	6	6	6	6
Data	96	408	840	1680
Pilot	12	60	120	240
Guard	19	91	183	369
DC	1	1	1	1
Free Slots/frame	16	68	140	368
Bytes por slot				
QPSK 1/2	6	6	6	6
QPSK 2/3	9	9	9	9
16-QAM 1/2	12	12	12	12
16-QAM 3/4	18	18	18	18
64-QAM 2/3	24	24	24	24
64-QAM 3/4	27	27	27	27
Capacidade (Mbps)				
QPSK 1/2	0,1536	0,6528	1,3440	3,5328
QPSK 2/3	0,2304	0,9792	2,0160	5,2992
16-QAM 1/2	0,3072	1,3056	2,6880	7,0656
16-QAM 3/4	0,4608	1,9584	4,0320	10,5984
64-QAM 2/3	0,6144	2,6112	5,3760	14,1312
64-QAM 3/4	0,6912	2,9376	6,0480	15,8976

Tabela 3.3 – Capacidade útil para cada modulação, em *uplink* PUSC

3.3. Soluções Tecnológicas

A introdução da mobilidade e da norma IEEE 802.16e veio também alargar o espectro de soluções tecnológicas para a implementação de WiMAX. Algumas já existiriam em normas anteriores, no entanto a sua implementação justifica-se em ambientes móveis. Irão ser estudadas:

- SISO (*Single Input single Output*)
- SIMO (*Single Input Multiple Output*)
- MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)
- *Space Time Coding*
- *Spacial Multiplexing*
- *Adaptive Beamforming*

3.3.1. SISO

SISO significa *Single Input Single Output* e trata-se da implementação clássica de WiMAX. Nesta configuração apenas se considera 1 antena de transmissão na BS e 1 antena de recepção (no equipamento terminal). Pela sua simplicidade é a tecnologia que está mais sujeita a erros de transmissão, bem como taxas da mesma mais reduzidas. Portanto espera-se que seja uma tecnologia à qual não se irá recorrer frequentemente. No entanto, para se estudar sistemas MIMO começa-se por estudar estes sistemas, já que o desempenho dos sistemas MIMO depende em muito do desempenho SISO.

3.3.2. SIMO

SIMO (*Single Input Multiple Output*) trata-se na realidade de uma variante de MIMO. Neste tipo de transmissão existe 1 antena no transmissor e 2 antenas de recepção (1x2). Pode-se dizer que esta configuração é a típica de WiMAX. Tira partido de *multipath* para melhorar tanto o *downlink* como o *uplink*, em termos de força do sinal recebido quando comparado com a configuração SISO. A existência de duas antenas de recepção tanto na BS como no equipamento móvel favorecem a potência do sinal recebido, através do uso de diversidade e da maximização da combinação de várias técnicas.

3.3.3. MIMO

A configuração MIMO (Multiple Input Multiple Output) não é mais do que a adição de uma segunda antena de transmissão na configuração anterior. Isto irá possibilitar dois modos adicionais de *downlink* com performance melhorada. São eles *Space Time Coding* (MIMO Matriz A) e *Spacial Multiplexing* (MIMO Matriz B). No primeiro caso, os *streams* são enviados a partir de cada antena de transmissão, de forma idêntica. Ou seja, estão a ser enviados *streams* idênticos de dados de forma simultânea. Isto fornece diversidade tanto em termos de espaço como em termos de tempo, tornando-se assim indicado para ambientes com rápido desvanecimento e *multipath* já que através de *Space Time Coding* a relação entre sinal e ruído (SNR) do sinal recebido na estação móvel é melhorada. Isto possibilita que a estação móvel suporte modulações mais

eficientes, o que vai resultar no final em melhor capacidade *downlink*, bem como um maior alcance.

No caso de *Spatial Multiplexing*, cada antena irá enviar diferentes *streams* de *downlink*. Esta técnica tira partido do *Multipath* para distinguir entre os diferentes fluxos de dados. Desta forma, teoricamente, será possível duplicar a capacidade de *downlink* em condições favoráveis de canal.

Existe também a possibilidade de tirar partido destes dois modos, através de MIMO adaptativo. Isto vai permitir que haja comutação entre a MIMO Matriz A e B, dependendo das condições existentes no canal.

No que diz respeito ao *Uplink*, a capacidade do canal sofre também melhoria com o uso de 2 antenas de transmissão. Isto deve-se ao facto de ambas transmitirem de forma cooperativa nos mesmos *slots* de tempo – *Uplink Collaborative Spatial Multiplexing*.

O uso de MIMO é mais eficaz em áreas urbanas e suburbanas, em que se espera que o *Multipath* seja considerável. Caso não haja *Multipath* suficiente, a tecnologia MIMO suporta a possibilidade de introduzir diversidade através de polarização dual, o que fornece dois sinais ortogonais obtendo-se daí uma melhor performance.

A introdução de MIMO numa BS WiMAX acrescenta complexidade, uma vez que o próprio uso de 2 antenas obriga a uma gestão de potência e multiplexagem bastante rigorosas. Isso obriga, certamente, a um custo associado elevado. No entanto, o ganho em termos de capacidade é considerável, pelo que o recurso a esta tecnologia compensará.

3.3.4. Adaptive Beamforming

Esta trata-se de mais uma opção avançada de antena que a tecnologia WiMAX suporta. Poderá ser implementada de mais do que uma forma.

A abordagem mais simples consiste em comutar entre várias antenas cujo feixe será estreito e direccionado, ou comutar entre diferentes feixes num *array* de antenas.

Uma segunda abordagem consiste em implementar um algoritmo que direcciona dinamicamente o feixe (*Direction of Arrival – DOA*). Esta técnica é conhecida por “*Dynamically Phased Array*”.

Estas técnicas melhoram a potência do sinal recebido o que por si só fornece um melhor alcance e capacidades, apesar de continuar sujeito a fenómenos tipicamente urbanos como *scattering* e *multipath*.

Uma terceira técnica de *beamforming* consiste em determinar os parâmetros de formação de feixes de forma adaptativa, baseando-se tanto nas condições do canal como das próprias interferências. Esta técnica denomina-se “*Adaptive Beamforming*” e permite que o *array* de antenas maximize a potência do sinal para o utilizador pretendido, possuindo também um mecanismo para anular as interferências. Através desta técnica é possível implementar outros algoritmos para melhorar a relação do sinal com o ruído bem como interferência (SINR) nos vários cenários de propagação. Num cenário de alta mobilidade em que o canal tem variações rápidas poderá ser um desafio implementar esta técnica de forma exacta. No entanto existem resultados práticos que atestam uma melhoria no sinal recebido em cenários urbanos com mobilidade.

A complexidade desta técnica envolve antenas electronicamente direccionáveis, de forma a poder fornecer fase e amplitudes apropriadas, envolvendo também técnicas de processamento digital do sinal para analisar a ligação em tempo-real e dessa forma poder “manobrar” a direcção das antenas.

A vantagem na utilização destas técnicas reside no aumento de alcance que as mesmas fornecem, sendo, portanto, mais indicado para implementações em que o alcance é o factor mais importante. Verifica-se uma melhoria tanto na direcção *uplink* como *downlink*. Esta última depende, no entanto, de do alcance do *Media Access Protocol* (mensagens MAP), na medida em que a possibilidade de suporte de vários utilizadores em simultâneo dentro de determinada área depende do envio de mensagens MAP para todos os utilizadores do sector. Uma vez que estas mensagens são transmitidas em *broadcast*, o ganho em alcance de *downlink* poderá não ser aproveitado ao máximo já que será necessária a múltipla repetição das mesmas para assegurar fiabilidade na transmissão.

3.4. Outros Aspectos Introduzidos pela Mobilidade

3.4.1. Handover

A operação de *handover*, ou também conhecida por *handoff* trata-se da possibilidade de um MS se deslocar de uma célula para outra sem que haja

interrupção da sessão em curso. Trata-se portanto de uma introdução quase obrigatória na norma IEEE 802.16e, quando se começa a falar de WiMAX móvel.

Assim, a norma define dois tipos genéricos de *handover*:

- *Hard handover*: também é conhecido como *break-before-make*, já que implica que a ligação rádio seja desconectada momentaneamente para depois ser estabelecida com a nova BS. Este tipo de *handover* não é muito complexo.
- *Soft handover*: também é conhecido como *make-before-break*, uma vez que a MS estabelece primeiro a ligação rádio com a nova BS e só depois desliga a anterior com a primeira BS. Existe a possibilidade da MS ter duas ou mais ligações com duas ou mais BS, podendo depois optar pela melhor ligação. Este tipo de *handover* é mais rápido que o anterior. O *Soft Handover* pode ser de dois tipos:
 - *Fast BS Switching*: permite que a MS troque rapidamente de uma BS para outra. A rapidez da troca deve-se ao facto da MS executar a troca sem ter completado o processo de entrada na nova BS.
 - *Macro Diversity Handover*: as transmissões são feitas entre a MS e mais do que uma BS.

Nos perfis de WiMAX, apenas o *hard handover* é obrigatório, sendo que estes 2 últimos são opcionais.

3.4.2. Características de poupança de energia

O WiMAX móvel possui características que permitem aos aparelhos poupar energia de forma eficiente. Estes permitem às SS operar durante períodos de tempo maiores sem haver necessidade de recarregar. Isto é conseguido ao se desligarem componentes da estação móvel (MS) de forma controlada quando esta não está a transmitir ou receber dados. Assim, o WiMAX móvel tem definidos métodos de sinalização que permitem à MS entrar em modos *Sleep Mode* ou *Idle Mode* quando se encontra inactiva. O primeiro é um estado no qual a MS se desliga e se torna indisponível durante tempos pré-determinados. Já a segunda hipótese é opcional no WiMAX e permite à MS que se desligue completamente para que não esteja registado em nenhuma BS e mesmo assim ainda receba

mensagens de tráfego *broadcast downlink*. Este modo é melhor em termos de poupança de energia na medida em que a MS não se regista em nenhuma BS específica, ao contrário do *sleep mode*.

3.4.3. Serviços de *Broadcast e Multicast*

A camada de acesso ao meio do WiMAX móvel suporta serviços de *multicast* e *broadcast* (MBS). As funções e características relacionadas com MBS suportadas pela norma incluem mecanismos de sinalização para pedir e estabelecer MBS; acesso da SS a MBS através de uma única ou múltiplas BS, dependendo da sua capacidade; QoS associada a MBS; uma zona distinta entre a *frame* MAC com a sua própria informação MAP destinada a tráfego MBS; métodos de entrega de tráfego MBS para SS a operar em modo *Idle*; suporte para macro-diversidade com vista a melhorar a performance de entrega de tráfego MBS.

3.5. Sumário

Este capítulo mostrou alguns dos aspectos principais acerca da mobilidade em WiMAX, que foi introduzida na norma IEEE 802.16e. Ao nível da camada física as alterações foram maiores, na medida em que começou a ser utilizado OFDMA, em detrimento de OFDM, com alterações notórias provocadas por esse facto. Este capítulo também abordou algumas das novidades introduzidas pela mobilidade, como a necessidade obrigatória de haver um *handover* eficaz, ou a possibilidade de implementação de técnicas MIMO, com elevados ganhos em termos de capacidade e/ou alcance.

4. Parâmetros para Planeamento de uma Rede WiMAX

Após conhecer algumas das características principais da tecnologia WiMAX, é possível apresentar algumas soluções para a possível implementação de uma rede WiMAX. Há diversos aspectos que são fundamentais. Um destes aspectos tem a ver com a previsão da capacidade necessária para a área em questão. Para tal, aquilo que é proposto neste trabalho passa primeiro por considerar os serviços mais utilizados no dia-a-dia e os seus requisitos. De seguida, é necessário definir perfis de utilizadores, em que cada perfil utilizará os ditos serviços de forma distinta, conforme a natureza das suas necessidades. Desta forma, já é possível calcular qual a capacidade média que será necessária para satisfazer estes utilizadores. O passo seguinte consiste em fazer um estudo ao nível do terreno, ou seja, prever, com base nos elementos que se tem, qual o alcance que a célula terá e, em média, qual a capacidade que esta irá suportar. Tendo todos estes elementos e resultados, será então possível analisar as várias alternativas possíveis, de forma a encontrar a melhor solução para cada caso. Este estudo incide sobre WiMAX fixo.

Este capítulo mostrará então uma abordagem possível para a parametrização dos requisitos de uma rede. Para além disso também irão ser discutidos assuntos relevantes para o planeamento de uma rede WiMAX: alcance / cobertura, estrutura celular, preocupações ao nível do espectro disponível e sectorização.

O capítulo encontra-se, então, estruturado da seguinte forma: A secção 4.1 denomina-se de Caracterização de Serviços e irá referir quais os serviços considerados no estudo, bem como seus requisitos e utilizadores-alvo. Na secção 4.2 – Alcance e Cobertura – faz-se um estudo acerca das perdas de percurso características de sistemas *wireless*, apresentando um modelo de propagação que ajuda à previsão das mesmas e caracterizando os tipos de terreno em que o dito modelo é aplicável.

4.1. Caracterização dos Serviços

Tal como já foi referido anteriormente, a abordagem seguida para a resolução do problema é a de considerar os vários serviços que são mais utilizados hoje em dia. Dessa forma, e conhecendo os requisitos dos mesmos para um bom funcionamento, é possível prever qual a capacidade que o sistema terá que

oferecer para poder satisfazer os seus clientes. O tráfego é caracterizado através da intensidade de tráfego, que se obtém conhecendo a periodicidade e duração de cada chamada.

Os serviços distinguem-se em duas categorias: Residencial e Empresarial. Consideram-se então como serviços residenciais VoIP, Dados, IPTV, Peer2Peer, Media Stream e Jogos Online. Já no que diz respeito aos serviços empresariais, considera-se a utilização de VoIP, Dados e Videoconferência. Estes são serviços comuns bastante usados actualmente no quotidiano. Assim, os seus requisitos em termos de largura de banda necessária considerados estão presentes na tabela 4.1. Por um lado há serviços cujos requisitos para estabelecimento de chamada são conhecidos, como é o caso de VoIP ou IPTV. Por outro lado, há serviços em que a largura de banda é aqui atribuída como um valor razoável, nomeadamente nos casos de Dados e P2P.

	Tipo de Serviços	VoIP [18]	Dados	IPTV [19]	Media Stream [3]	Jogos Online [3]	P2P	Videoconferência [11]
Largura de Banda Necessária (Mbps)	Residencial	0,080	1,000	2,000	0,200	0,085	0,500	
	Empresarial	0,080	2,000					0,384

Tabela 4.1 – Requisitos de cada serviço

Neste caso, diferenciaram-se os requisitos em termos de uso empresarial ou residencial, principalmente para enfatizar a maior necessidade empresarial de transferências de dados.

Para além da distinção feita ao nível do tipo de serviços, também é necessário distinguir os diversos tipos de terreno onde possa estar a ser implementada a rede. De facto, este é um dos factores mais importantes que se deve ter em conta no planeamento de uma rede sem fios, uma vez que o sinal rádio está sujeito a vários fenómenos que lhe são maioritariamente destrutivos tais como perdas de percurso, *shadowing*, *mutipath*, entre outros. Neste contexto, consideram-se então três tipos de terreno com características geográficas distintas, o rural, suburbano e urbano. Este assunto será abordado mais à frente.

Agora, estão reunidas as condições para a criação de diferentes cenários, com diferentes tipos de utilizadores e necessidades. Consideram-se então quatro cenários distintos: Rural Residencial (A), Urbano Residencial (B), Urbano Empresarial (C) e Urbano Misto (D). Este último trata-se de um cenário urbano,

em que coexistem utilizadores empresariais e utilizadores residenciais. Em relação aos tipos de terreno considerados, estes são de Rural para o cenário A, Suburbano para os cenários B e C, e Urbano para o cenário D.

Cada tipo de utilização tem os seus serviços típicos, com requisitos específicos em termos de largura de banda, atrasos, *jitter*, entre outros. Estes requisitos são cumpridos pela própria tecnologia WiMAX, através do escalonamento das classes de serviço já referidas: UGS, rtPS, nrtPS, BE e ertPS.

No que diz respeito ao tipo de utilização em cada cenário, esta difere para cada um deles, na medida em que se considera que os serviços utilizados são distintos já que é legítimo assumir que utilizadores rurais poderão ter necessidades de utilizadores urbanos, por exemplo. Assim, para o cenário A considera-se a utilização de VoIP, dados e IPTV. Já no cenário B considera-se a utilização de VoIP, IPTV, Dados, Media Streaming, P2P e Jogos Online. No cenário C considera-se que os serviços utilizados são VoIP, Dados e Videoconferência. O cenário D, tal como dito anteriormente, é composto por utilizadores típicos dos cenários B e C, logo os serviços são os do conjunto destes dois cenários.

Também é levado em linha de conta neste estudo o horário de utilização, sendo separado em dois períodos distintos: horário diurno e horário nocturno.

Considera-se que as chamadas de cada serviço chegam ao sistema de acordo com um processo de *Poisson* com taxa λ e têm um tempo de permanência exponencialmente distribuído de média $1/\mu$. Desta forma, a intensidade do tráfego oferecido é dada por $\rho = \lambda / \mu$ [20].

Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
Utilização residencial	Utilização residencial	Utilização empresarial	Utilização residencial e empresarial
Espaço aberto	Espaço suburbano	Espaço suburbano	Espaço urbano/denso
VoIP, Dados e IPTV	VoIP, Dados, IPTV, Media Stream, P2P e Jogos Online	VoIP, Dados e Videoconferência	VoIP, Dados, IPTV, Media Stream, P2P, Jogos Online e Videoconferência

Tabela 4.2 – Caracterização dos diversos cenários em estudo

Cada tipo de utilização tem os seus serviços típicos, com requisitos específicos em termos de largura de banda, atrasos, *jitter*, entre outros. Por outras palavras, existe a necessidade de mecanismos de QoS. Estes requisitos são cumpridos pela própria tecnologia WiMAX, através de escalonamento das classes

de serviço já referidas: UGS, rtPS, nrtPS, BE e ertPS. De acordo com as características de cada serviço, bem como as características de cada classe, as várias classes são atribuídas aos serviços de acordo com a tabela 4.3.

Aplicações	Classe de Serviço
VoIP	UGS
Dados	BE
IPTV	rtPS
Media Stream	rtPS
Jogos Online	rtPS
P2P	nrtPS
Videoconferência	rtPS

Tabela 4.3 – Classe de serviço para cada aplicação

4.2. Alcance e Cobertura

As perdas médias de percurso num canal de rádio são normalmente estimadas utilizando modelos analíticos fundamentadas tanto em leis da Física como em curvas estatísticas obtidas através de medidas práticas. Para a maioria dos cenários de implementação práticos, e em particular os casos NLOS, os modelos estatísticos baseados em dados empíricos tornam-se mais úteis, principalmente em casos em que as condições geográficas da área são desconhecidas. De forma geral, o valor médio de perdas de percurso pode ser modelado utilizando o modelo logarítmico de perdas de percurso dado pela fórmula (1):

$$PL = PL_{d0} + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d0}\right) = 20 \log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi d0}\right) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d0}\right) (1)$$

Sendo d a distância, d0 uma distância de referência, PL_{d0} a perda de percursos à distância $d=d0$ e n o coeficiente de perdas. Este coeficiente de perdas depende do tipo de terreno, sendo um valor que normalmente varia entre 2 e 5. Os modelos logarítmicos de perdas normalmente são extendidos com factores de correcção adicionais, tornando os modelos aplicáveis a diferentes frequências de operação e alturas de antena. De modo geral, os modelos empíricos são mais indicados para sistemas que operam abaixo de 3GHz, sendo que a aplicabilidade a frequências superiores se torna de certo modo incerta. Assim, surgem hipóteses para modelos apropriados para bandas de 2.5 e 3.5GHz, como por exemplo o modelo SUI (Stanford University Interim).

O modelo SUI divide-se em 3 tipos de ambiente (A, B e C). O tipo A é associado à máxima perda de percurso, sendo apropriada para regiões bastante acidentadas com vegetação de densidade moderada a intensa. Já o tipo C é apropriado para uma densidade leve de vegetação, sendo que o tipo B é de certa forma um intermédio entre A e C. Assim, a equação das perdas de percurso incluindo factores de correcção fica

$$PL = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s(2)$$

Sendo s ($s \in [8.2, 10.6]$ dB) o factor de distribuição estatística do tipo lognormal que é utilizado para calcular o desvanecimento devido a obstáculos, γ (expoente de factor de perdas), X_f (factor de correcção para a frequência de operação) e X_h (factor de correcção para a altura da antena do receptor) são dados pelas fórmulas (3), (4) e (5), respectivamente.

$$\gamma = a - b h_b + \frac{c}{h_b} \quad (3), \text{ em que } h_b \text{ é a altura do transmissor em metros. Os}$$

parâmetros a , b e c são constantes que dependem do tipo de terreno e estão presentes na tabela 4.4.

$$X_f = 6.0 \log_{10} \left(\frac{f}{2} \right) \quad (4)$$

enquanto X_h depende do tipo de terreno:

$$\begin{cases} X_h = -10.8 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2} \right) \quad (5.1), \text{ para terrenos dos tipos A e B} \\ X_h = -20 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2} \right) \quad (5.2), \text{ para terrenos do tipo C} \end{cases}$$

sendo f dado em GHz e h_r (altura da antena do receptor) dado em metros.

Parâmetros	Tipo A	Tipo B	Tipo C
A	4.6	4.0	3.6
b (m ⁻¹)	0.007	0.006	0.00
c (m)	12.6	17.1	20

Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo SUI

A figura 4.1 mostra a variação do valor de perdas de percurso em dB esperado, baseado no modelo SUI, assumindo valores de frequência de 3.5 Ghz, altura de receptor de 2m, altura de antena de 45m e factor de distribuição estatística 's' de 8.2 dB.

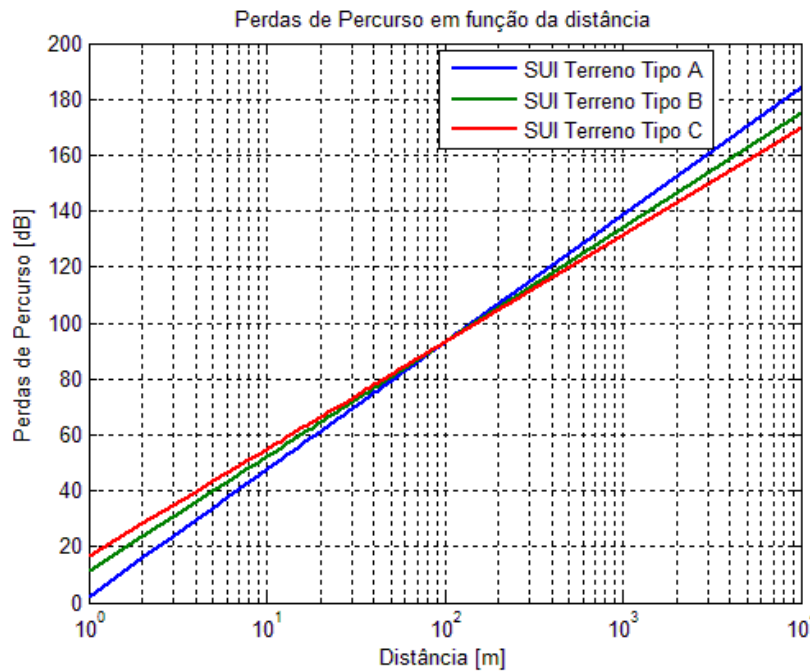


Fig.4.1 – Gráfico das perdas de percurso em função da variação da distância à BS.

Tal como seria de esperar, com o aumento da distância as perdas tornam-se maiores, sendo que para cenários com maior densidade de obstáculos, as perdas são maiores. Também é interessante mostrar a variação das perdas de percurso em função da variação da altura do transmissor. Verifica-se desta forma que a BS deve estar colocada a uma altura razoável, já que para maior altura, menores são as perdas de percurso.

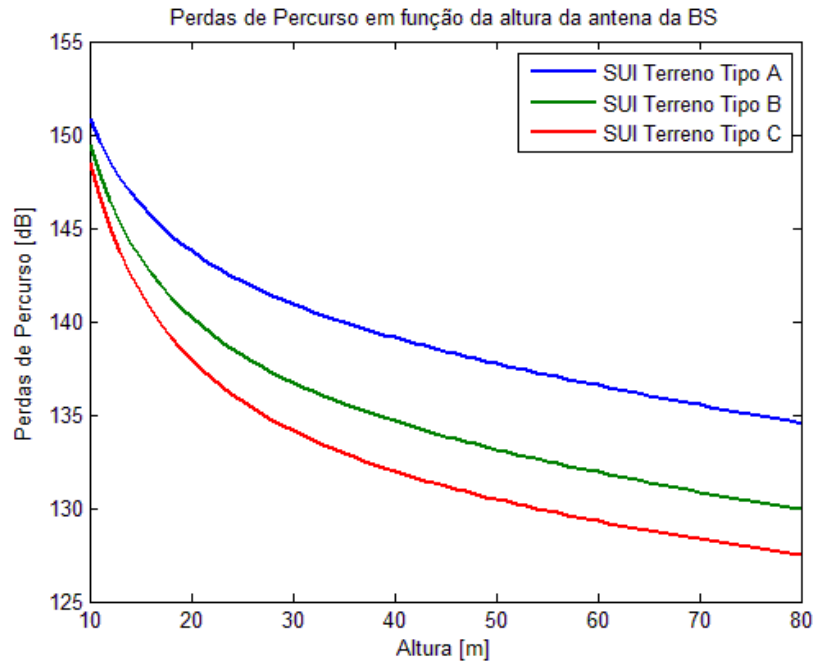


Fig.4.2 – Gráfico das perdas de percurso em função da variação da altura da BS, à distância de 1Km.

Após saber quais as perdas de percurso associadas a determinada distância, o passo seguinte é calcular qual o alcance da célula. Para ajudar neste cálculo, recorre-se à fórmula (6) presente na tabela 4.5. Esta fórmula permite o cálculo da potência no receptor sendo que um dos seus parâmetros é precisamente as perdas de percurso, variável com a distância.

$P_R = P_T + G_T + G_R - L_S - PL$ <p>(6)</p>	P_R – Potência no receptor [dBm]
	P_T – Potência no transmissor [dBm]
	G_T – Ganho do transmissor [dBi]
	G_R – Ganho do receptor [dBi]
	L_S – Perdas do sistema (Soma das perdas do receptor com as do transmissor)[dB]
	PL – Perdas de percurso [dB]

Tabela 4.5 – Potência no receptor (parâmetros e respectivas unidades)

Partindo da condição de que $P_R \geq S_R$ (7), e resolvendo a equação em ordem a PL fica $PL = P_T - L_S + G_R + G_T - S_R$ (8). Como é sabido, PL é função da distância percorrida, pelo que relacionando as fórmulas (2), (6) e (7) obtém-se, então, “d” através de:

$$d = d0.*10^{\left[\frac{\left(P_T - L_S + G_R + G_T - S_R - X_f - X_h - s - 20 \log \left(\frac{4\pi d0}{\lambda} \right) \right)}{10\gamma} \right]} \quad (9)$$

Os parâmetros P_T , L_S , G_R e G_T são valores característicos de um sistema WiMAX. Já os parâmetros X_f , X_h , γ e s são dados pelo modelo de propagação. O parâmetro S_R corresponde à sensibilidade do receptor e depende da modulação usada, bem como da relação entre sinal e ruído no receptor. Este parâmetro é dado pela fórmula $S_R = -102 + SNR(Rx) + 10 \log \left(F_S * \left(\frac{N}{N_{FFT}} \right) * \left(\frac{N_{subchannel}}{16} \right) \right) (10)$, em que $N=192$; $N_{FFT}=256$. O SNR no receptor está definido na norma, e apresenta-se na tabela 4.6.

Modulação	SNR(Rx) [dB]
BPSK $\frac{1}{2}$	6,4
QPSK $\frac{1}{2}$	9,4
QPSK $\frac{3}{4}$	11,2
16-QAM $\frac{1}{2}$	16,4
16-QAM $\frac{3}{4}$	18,2
64-QAM $\frac{2}{3}$	22,7
64-QAM $\frac{3}{4}$	24,4

Tabela 4.6 – SNR(Rx) para as diferentes modulações [1]

Aplicando estes valores na fórmula (10), chega-se aos valores de sensibilidade no receptor, sendo então a partir de agora possível o dimensionamento das células, ao calcular o alcance para cada modulação.

	Sensibilidade do receptor [dB]					
Modulação	3,5 MHz	5 MHz	7 MHz	10 MHz	14 MHz	20 MHz
BPSK	-96,85	-95,30	-93,84	-92,29	-90,83	-89,28
QPSK 1/2	-93,85	-92,30	-90,84	-89,29	-87,83	-86,28
QPSK 3/4	-92,05	-90,50	-89,04	-87,49	-86,03	-84,48
16-QAM 1/2	-86,85	-85,30	-83,84	-82,29	-80,83	-79,28
16-QAM 3/4	-85,05	-83,50	-82,04	-80,49	-79,03	-77,48
64-QAM 2/3	-80,55	-79,00	-77,54	-75,99	-74,53	-72,98
64-QAM 3/4	-78,85	-77,30	-75,84	-74,29	-72,83	-71,28

Tabela 4.7 – Sensibilidade no receptor para cada modulação e largura de banda

Desta forma, é agora possível calcular o alcance de uma célula WiMAX, porque já há conhecimento de todos os parâmetros da fórmula (4.1). Os parâmetros X_f , X_h , γ e s dependem do tipo de terreno e alturas do transmissor e receptor. O parâmetro S_R foi calculado e encontra-se na tabela 4.6. Os

parâmetros P_T , L_S , G_R , G_T são tidos como constantes e irão ser atribuídos em altura oportuna, consoante valores típicos nesta tecnologia.

4.3. Sistemas Celulares

Na secção anterior tornou-se claro que devido às perdas de percurso apenas é possível comunicar de forma fiável sobre uma distância limitada. Assim, o planeamento do alcance da célula é projectado de forma a que no limiar da distância máxima ainda seja possível comunicar de forma fiável. Para tal, o controle é feito ao nível da potência de transmissão.

Em sistemas celulares, a área de serviço é subdividida em áreas geográficas menores, a que se denominam de células. Cada célula é servida por uma BS própria. De forma a minimizar a interferência entre células e garantir fiabilidade de transmissão, a potência de transmissão é regulada de forma a que a potência no limiar da célula seja a suficiente. Assim, poderão ser utilizados canais com a mesma frequência em diferentes células, desde que se garanta que estas estão espaçadas o suficiente para evitar que haja interferências.

Este espaçamento entre as diferentes células (muito) dificilmente será o perfeito. Assim é necessário definir um padrão de reuso das frequências de modo a que o nível de interferência entre BS se mantenha num nível aceitável. Assim, o factor de reuso tem que ser decidido de forma inteligente, na medida em que por um lado o espectro disponível tem que ser respeitado e por outro deve-se maximizar a distância geográfica entre canais que partilhem o mesmo canal. Conceptualmente, considera-se que as células têm uma forma hexagonal. Trata-se do modelo mais aceite, principalmente pela simplicidade de cálculos que apresenta, já que na realidade não se verifica esta forma geométrica (devido aos vários fenómenos que afectam o sinal, a célula tem a tendência de apresentar uma forma amebóide).

Os sistemas celulares também têm características importantes ao nível da escalabilidade, já que permitem que se projectem as células com dimensões menores, o que possibilita o aumento da capacidade e a diminuição da potência do sinal. Apesar destes aspectos vantajosos de células de menores dimensões, é lógico que será necessário utilizar um número maior de BS o que aumenta consideravelmente os custos de implementação. Por outro lado, se estivermos a

imaginar um ambiente de WiMAX móvel, iria implicar uma maior complexidade neste sistema, na medida em que se iria estar perante *handoffs* frequentes, bem como uma maior variabilidade no tráfego desta célula.

Em suma, a estrutura celular apresenta várias vantagens. Estas passam pela possibilidade de reutilização do espectro electromagnético, o que implica possibilidade de obter maior capacidade e servir assim um maior número de utilizadores; em relação a um sistema sem reutilização do espectro, apresenta menores potências de transmissão; trata-se de uma estrutura descentralizada e por isso mais robusta; apresenta uma maior adaptabilidade à área que rodeia a BS, no que diz respeito a área de transmissão, interferência, entre outros. Por outro lado, o uso de uma estrutura celular poderá levantar alguns problemas, entre os quais se destaca a interferência com outras células, que se pode minimizar, mas dificilmente eliminar; em cenários de implementações móveis, é necessário arquitectar um sistema de *handover*, para garantir manutenção da conectividade em transições entre células.

Tendo em conta todos os prós e contras, cabe então ao projectista encontrar um ponto de equilíbrio entre todos os elementos de uma rede com estrutura celular, para satisfazer as necessidades dos utilizadores ao melhor custo possível.

4.4. Análise do espectro disponível na viabilidade da tecnologia

O espectro disponível é um dos factores-chave para fornecer serviços de banda larga em redes sem fios. Há várias bandas de frequências que podem ser usadas para implementações WiMAX. Cada uma delas tem características cujo impacto no desempenho do sistema é significativo. É a banda de frequências que muitas vezes limita as taxas de transferência e alcances de cobertura. No processo de certificação levado a cabo pelo WiMAX Forum, estão definidas as bandas de 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5GHz e 5.7GHz como as que serão mais usadas para implementação de WiMAX. No caso da Europa, espera-se que a banda de 3.5 GHz seja a mais usada.

No entanto, a escassez de espectro poderá ser uma das limitações da tecnologia. Como se sabe, o espectro é gerido por entidades reguladoras que apenas colocam disponível uma pequena quantidade de espectro para uso

comercial. A necessidade de servir um número de utilizadores cada vez maior e oferecer largura de banda a aplicações exigentes mediante o espectro limitado torna-se um desafio com o qual se tem que lidar. O aspecto referido anteriormente da sectorização está também intimamente ligado com o problema da escassez de espectro, na medida em que para se obter uma boa eficiência espectral recorre-se a esta técnica. Assim, o espectro disponível é dividido entre as células ou sectores e repetido na área que necessita de cobertura, de modo a formar um padrão e gerir o espectro disponível – reutilização da frequência.

Para se obter maior capacidade e eficiência espectral, deve-se maximizar a reutilização da frequência. No entanto, isto poderá aumentar a interferência. Por todos estes motivos é necessário projectar os esquemas de transmissão e recepção de forma a que possam operar mesmo quando as condições do sinal em termos de interferência e ruído (SINR) sejam baixas.

Assim, os operadores terão que projectar as suas redes de forma a obter uma boa relação entre capacidade e custo de implementação, mediante o espectro disponível.

No caso de Portugal, a entidade reguladora após ter inquirido o mercado deliberou a atribuição de 4 licenças, em que cada uma terá uma quantidade de espectro de 2x28 MHz. Ou seja, cada operadora terá que lidar com 2x28MHz para gerir a sua rede WiMAX. Os perfis de tamanho de canal existentes são todos múltiplos inteiros de 1.75 MHz (1.75, 3.5, 7 MHz). Uma implementação semelhante à da figura 1, com um factor de reuso de 4, por exemplo, e utilizando canais de 3.5MHz iria significar uma necessidade de 14+14MHz de espectro. Já para canais de 7 MHz com o mesmo factor de reuso estar-se-ia a usar todo o espectro disponível. No contexto do primeiro exemplo iria haver uma quantidade razoável de espectro que não seria usada, o que implicaria um estudo de custo/implementação para verificar se realmente seria esta a melhor solução, já que se poderia também fazer uma implementação com células de menores dimensões e também utilizando canais de menor largura de banda, com um factor de reutilização maior que 4. Desta forma poder-se-ia usar melhor o espectro e porventura obter melhor desempenho – menos interferência – mas tendo por outro lado um custo maior em termos de antenas e BS.

4.5. Sectorização

Por vezes a capacidade obtida por célula revela-se insuficiente. Nesse contexto, o uso da técnica de sectorização pode ser a solução mais eficaz para resolver esse problema, sendo também altamente recomendada para combater a interferência co-canal. Este tipo de interferência surge quando canais que usam a mesma frequência interferem entre si. Esta interferência pode ser minimizada através de um planeamento cuidadoso de forma a que diferentes células que usam a mesma frequência estejam a uma distância suficiente para que tal não se verifique. Assim, o uso de uma antena direccionada em vez de uma antena omnidireccional na BS pode reduzir de forma significativa a interferência entre os canais. É normal usar uma sectorização com factor 3, ou seja, dividir uma célula em 3 sectores. Desta forma está-se a usar 3 vezes mais largura de banda, mas obtém-se por outro lado um ganho na capacidade da célula de 3 vezes. Como cada sector pode reutilizar slots de tempo, não se perde capacidade através da sectorização, sendo que cada sector terá a mesma capacidade nominal que uma célula inteira. Para além disso, a capacidade é maior do que num sistema celular não sectorizado já que se reduz consideravelmente a interferência.

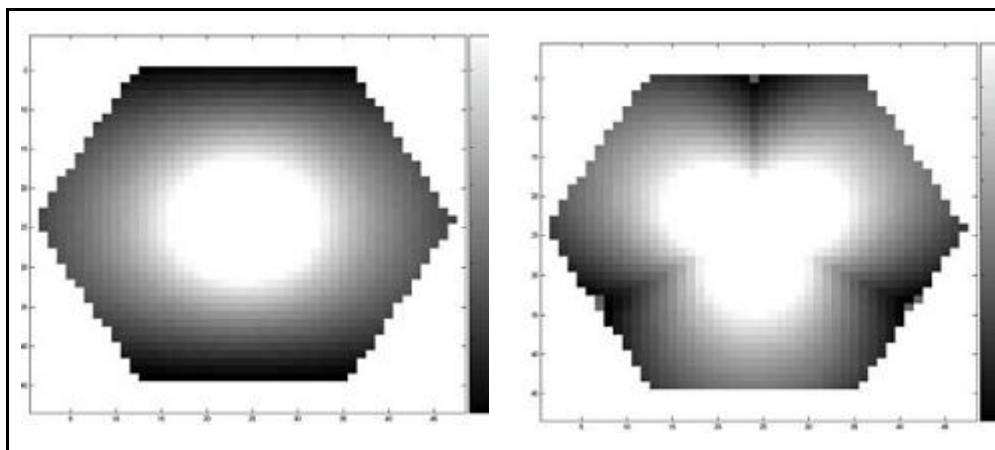


Fig. 4.3 – Comparação entre o SINR (Relação entre sinal, interferência e ruído), para uma célula com 1 sector (à esquerda) e 3 sectores (à direita), tendo ambos os sistemas um factor de reuso de 3 [3]

Através da figura 4.3 é possível verificar que a técnica da sectorização melhora significativamente a SINR num sistema. As zonas a escuro mostram SINR elevado. À esquerda, para um sistema celular não sectorizado com factor de reutilização da frequência de 3, nota-se uma maior percentagem de zonas em que a interferência e ruído são elevados. No caso da direita, em que se tem o mesmo factor de reutilização da frequência mas desta vez recorrendo à

sectorização, verifica-se que são menores as zonas de ruído e interferência elevados. Ou seja, em especial as zonas de fronteira da célula são aquelas em que é claramente benéfica esta técnica.

Esta solução tem, no entanto, algumas desvantagens. Apesar do *handover* entre sectores ser mais simples do que *handover* entre células, entre sectores tal acontece com maior frequência. Isto resulta num aumento deste tipo de transferências, podendo sobrecarregar a rede com o *overhead* que daí resulta.

Existe uma série de combinações possíveis para aplicar a técnica da sectorização. A figura 4.4 ilustra isso mesmo, podendo-se verificar as diferentes configurações que resultam da variação do número de células, bem como do número de sectores por célula e número de frequências diferentes usadas.

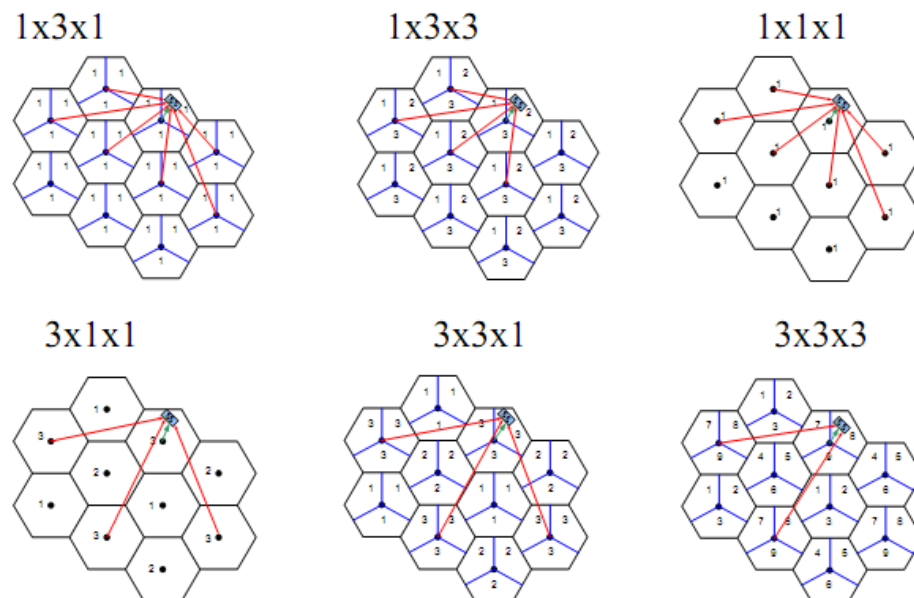


Fig. 4.4 – Diferentes esquemas de sectorização e reuso de frequências

4.6. Sumário

Este capítulo apresentou aspectos importantes a ter em conta quando se pretende efectuar planeamento celular. O planeamento celular envolve vários factores, o que resulta em várias soluções possíveis. Um exemplo de manipulação de factores da tecnologia é a possibilidade de sectorização com enormes vantagens em vários aspectos, mas limitada por aspectos relacionados com o espectro disponível e/ou custos de implementação.

Neste capítulo também foram abordados os serviços que este estudo irá considerar, apresentando algumas características como requisitos e classe de serviço.

5. Planeamento Celular

Um dos objectivos da dissertação prende-se com a idealização de cenários específicos com necessidades específicas e efectuar um estudo acerca das suas necessidades para poder satisfazer essas mesmas carências.

Assim, este capítulo surge nesse sentido, na medida em que neste momento já estão reunidas as condições para efectuar um cálculo objectivo e oferecer uma ideia concreta de como poderá ser a célula WiMAX em cada cenário.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na secção 5.1 serão apresentados os diversos cenários, parametrizando os serviços. São atribuídos valores razoáveis ao uso e duração dos diversos serviços em cada cenário, bem como nos horários diurno e nocturno. A secção 5.2 subdivide-se em quatro, compostas pelos diversos cenários idealizados, em que se apresenta uma solução efectiva para cada um deles.

5.1. Cenários Considerados e Parâmetros dos Serviços

Os cenários considerados neste estudo já foram explicitados anteriormente, bem como os serviços utilizados em cada cenário. São então 4 os cenários, identificados com as letras de A a D. O primeiro trata-se de um cenário Rural Residencial. O cenário B é um cenário também residencial, mas urbano, enquanto o cenário C é urbano empresarial. Por fim, o cenário D é urbano, com utilizadores empresariais e residenciais.



Fig.5.1 – Cenário de utilização adoptado

A tabela 5.1 apresenta, para cada um dos cenários, os parâmetros considerados para cada tipo de serviço. De notar que cada célula a zero significa que esse serviço não é utilizado nesse cenário específico. A coluna está estruturada da seguinte forma: existem 6 linhas principais, que estão divididas pelos vários cenários idealizados. Os valores presentes nas linhas referentes ao número de utilizações e duração média das mesmas foram introduzidos de forma razoável, de forma a espelhar a necessidade de cada um desses cenários. As restantes linhas são calculadas de acordo com estas duas primeiras. A intensidade de tráfego – ρ – caracteriza o tráfego. Como já foi referido no capítulo 4, considera-se que as chamadas chegam ao sistema de acordo com um processo de *Poisson* com uma taxa de chegada de λ , com um tempo de duração exponencialmente distribuído com média de $1/\mu$. O número de utilizações está relacionado com $\lambda - \lambda * 3600 = N^{\circ}$ utilizações / 12 – que neste caso se apresenta multiplicado por 3600 por uma questão de apresentação. Por outro lado, $1/\mu = \text{Duração} * 60$. Assim, a intensidade de tráfego é resultado do produto entre λ e $1/\mu$.

De notar que as várias células a zero significam que esse tipo de serviço não é utilizado nesse cenário. A intensidade de tráfego caracteriza o tráfego para cada cenário, já que apresenta, em média, a probabilidade de existir tráfego na rede,

para cada serviço. Assim, a secção “Capacidade” em cada uma das tabelas de utilização (5.1 e 5.2) é obtida através do cálculo do produto da intensidade de tráfego com a largura de banda necessária para cada serviço. Desta forma, obtém-se uma caracterização deste tráfego, em termos de capacidade [mbps]. A capacidade total do sistema não é mais do que o somatório da capacidade de todos os serviços, multiplicado pelo número de utilizadores presentes na célula, como é mostrado através das curvas do gráfico da figura 5.2.

		VoIP	Dados	IPTV	Media Stream	Jogos Online	P2P	Videoconferência
Nº de Utilizações neste período (12h)	A	5,000	4,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	7,000	6,000	2,000	0,071	0,012	0,024	0,000
	C	30,000	20,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,000
Duração Média de cada utilização (min)	A	10,000	30,000	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	5,000	40,000	60,000	30,000	60,000	30,000	0,000
	C	2,000	10,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,000
1/μ (seg)	A	600,000	1800,000	5400,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	300,000	2400,000	3600,000	1800,000	3600,000	1800,000	0,000
	C	120,000	600,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3600,000
λ*3600 (seg⁻¹)	A	0,417	0,333	0,083	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	0,583	0,500	0,167	0,006	0,001	0,002	0,000
	C	2,500	1,667	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250
ρ (λ/μ)	A	0,069	0,167	0,125	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	0,049	0,333	0,167	0,003	0,001	0,001	0,000
	C	0,083	0,278	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250
Capacidade ρ*LB (Mbps)	A	0,00556	0,16667	0,25000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	B	0,00389	0,33333	0,33333	0,00060	0,00008	0,00050	0,00000
	C	0,00667	0,55556	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,09600
	D	0,01056	0,88889	0,33333	0,00060	0,00008	0,00050	0,09600

Tabela 5.1 – Utilização dos vários cenários no horário diurno

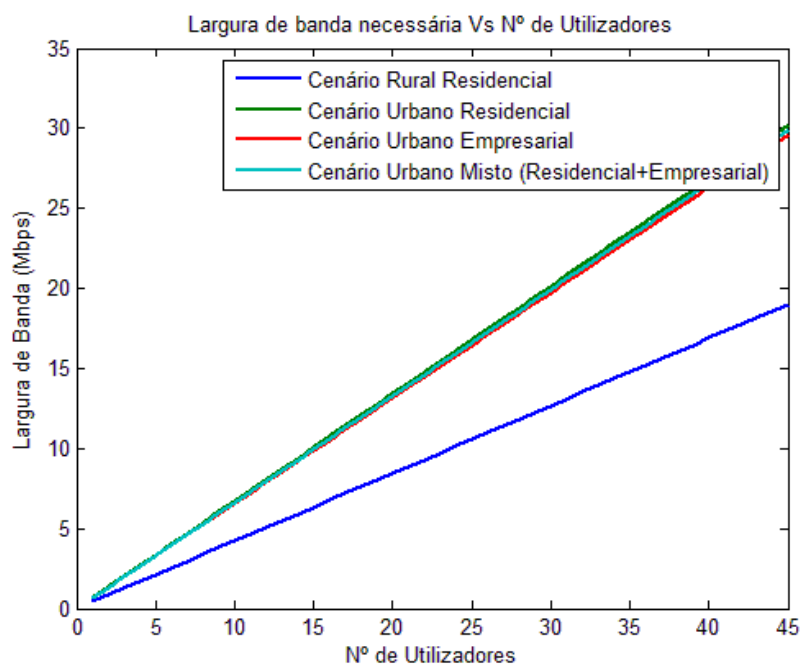


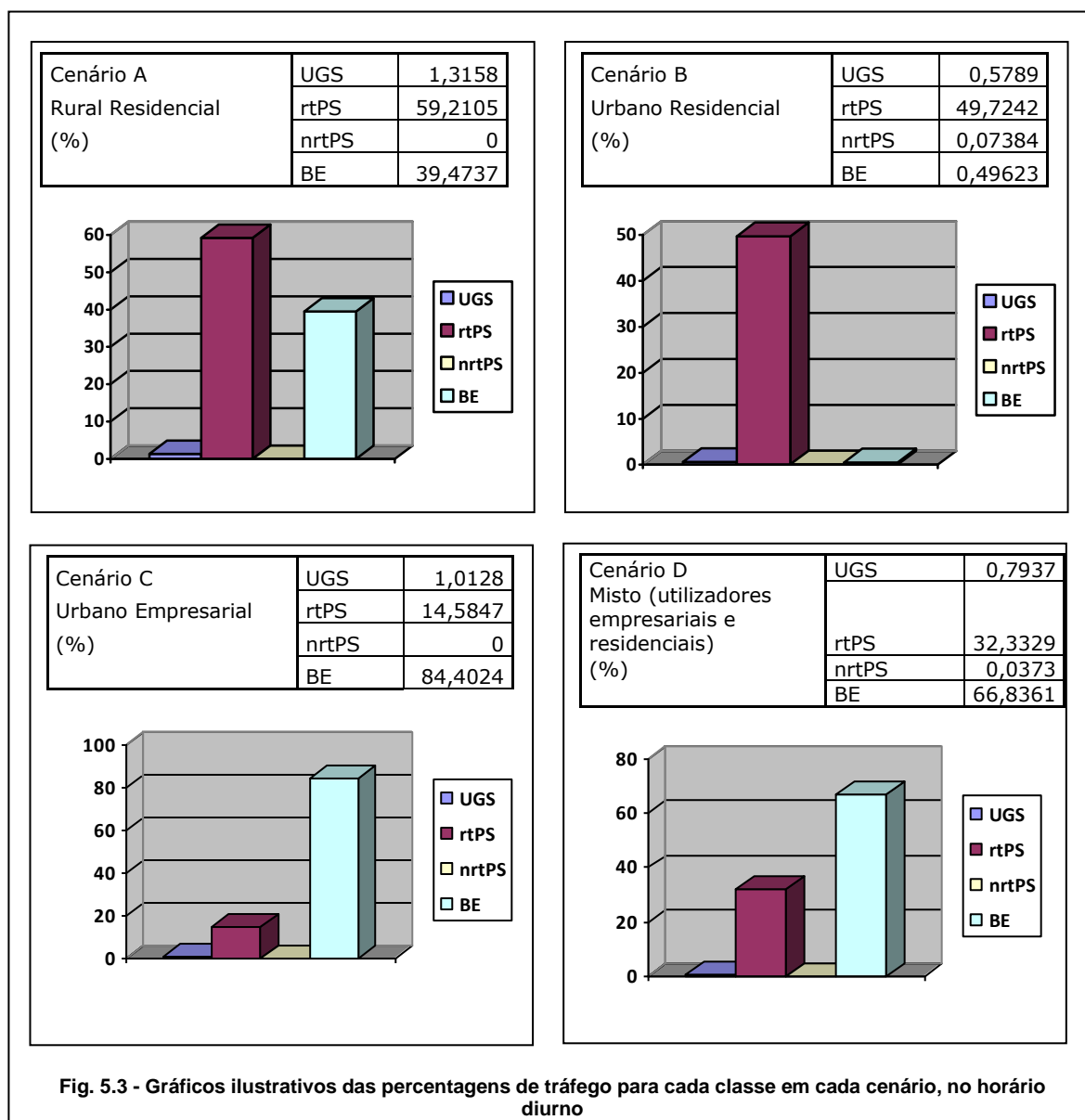
Fig.5.2 – Gráfico da Largura de Banda necessária em função do número de utilizadores, para o horário diurno

Já no período nocturno, a utilização de cada serviço nos vários cenários é dada pela tabela 5.2.

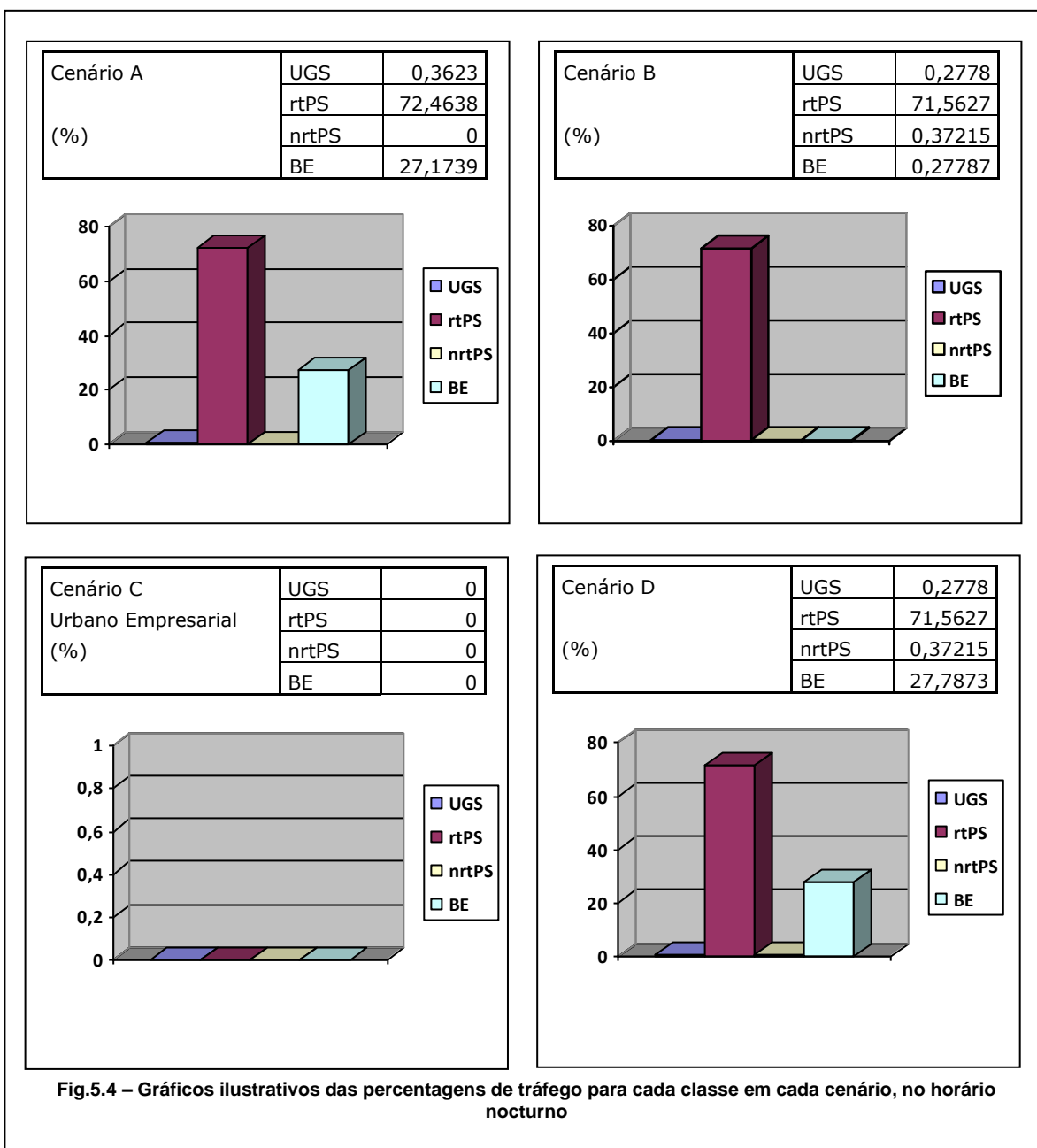
		VoIP	Dados	IPTV	Media Stream	Jogos Online	P2P	Videoconferência
Nº de Utilizações neste período (12h)	A	1,000	2,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	2,000	4,000	1,000	1,000	0,024	0,048	0,000
	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Duração Média de cada utilização (min)	A	10,000	30,000	80,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	5,000	20,000	100,000	30,000	15,000	45,000	0,000
	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1/μ (seg)	A	600,000	1800,000	4800,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	300,000	1200,000	6000,000	1800,000	900,000	2700,000	0,000
	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
λ*3600 (seg ⁻¹)	A	0,083	0,167	0,083	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	0,167	0,333	0,083	0,083	0,002	0,004	0,000
	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ρ (λ/μ)	A	0,014	0,083	0,111	0,000	0,000	0,000	0,000
	B	0,014	0,111	0,139	0,042	0,000	0,003	0,000
	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Capacidade ρ*LB (Mbps)	A	0,00111	0,08333	0,22222	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	B	0,00111	0,11111	0,27778	0,00833	0,00004	0,00149	0,00000
	C	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	D	0,00111	0,11111	0,27778	0,00833	0,00004	0,00149	0,00000

Tabela 5.2 – Utilização dos vários cenários no horário nocturno

A diferenciação dos vários serviços também permite, como já foi referido, distinguir quais as classes de serviço que predominam na rede. Isto poderá ser um importante trunfo na implementação de uma rede WiMAX, já que a previsão das classes de serviço que terão predominância na rede pode ter influência na escolha do melhor algoritmo de escalonamento, podendo assim ser optimizado o desempenho do escalonador. Apesar do objectivo desta dissertação não ser a proposta de um mecanismo de escalonamento, é interessante conhecer quais as classes de serviço que terão maior percentagem de uso, em cada cenário. As classes para cada serviço foram já atribuídas, remetendo para a tabela 4.3. Desta forma, sabendo qual a intensidade de tráfego para cada serviço, e agrupando as várias classes, obtém-se a percentagem de tráfego para cada classe de serviço. Esta informação encontra-se presente nas figuras 5.3 e 5.4, respectivamente para



os horários diurno e noturno.



5.2. Célula WiMAX para cada cenário

Neste momento, já se compreende o fenómeno de propagação do sinal rádio, bem como a capacidade que cada modulação pode oferecer. Já existem, portanto, condições para obter valores elucidativos em cada cenário. Sendo assim, as próximas secções irão apresentar estudos para os vários cenários idealizados, com valores concretos para cada um dos valores calculados ao nível do planeamento celular em termos de distância e capacidade do sistema.

5.2.1. Cenário A (Rural Residencial)

Para ser possível calcular o alcance da célula e das várias modulações, é necessário atribuir a certas constantes valores típicos de WiMAX. Assim, neste caso foram considerados os valores apresentados na tabela 5.3.

Parâmetro	Valor
BW	3.5 MHz
P_T	35 dBm
G_T	16 dBi
G_R	18 dBi
h_r	4 m
h_b	50 m
L_s	1.1 dB

Tabela 5.3 – Valores usados para simulação no cenário A

A cada modulação corresponde uma determinada distância. A figura 5.5 esquematiza as várias modulações ao longo da distância.

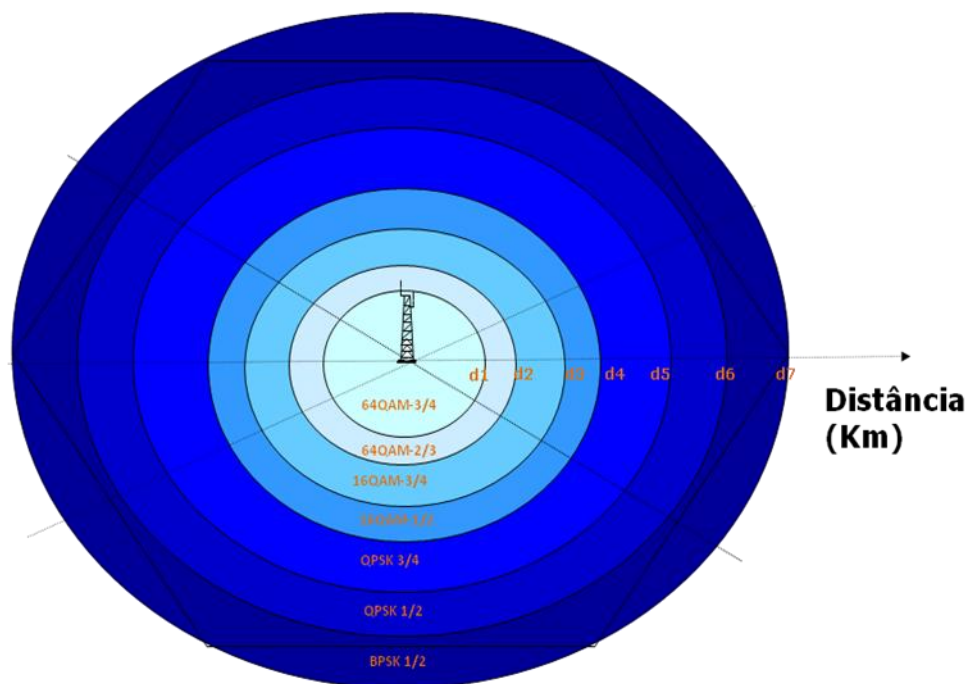


Fig. 5.5 – Esboço de uma célula WiMAX

Em cada modulação é necessário calcular a respectiva distância máxima, bem como a percentagem de cobertura. Para efectuar este cálculo é necessário calcular a área do hexágono: $A = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} * d^2$. Assim, tem que se calcular a

percentagem de área que cada modulação vai cobrir, para posteriormente perceber, dentro da capacidade total da célula, qual é a “fatia” a que corresponde cada modulação. A capacidade por modulação remete à tabela 2.5.

Modulação	Distâncias [km]	Área Coberta [km ²]	% coberta	Área	Capacidade [Mbps]
BPSK 1/2	8,20	53,85	30,83		0,45
QPSK 1/2	6,82	23,85	13,65		0,40
QPSK 3/4	6,11	45,77	26,20		1,14
16-QAM 1/2	4,44	10,27	5,88		0,34
16-QAM 3/4	3,97	17,41	9,97		0,87
64-QAM 2/3	3,01	4,46	2,55		0,30
64-QAM 3/4	2,71	19,08	10,92		1,43
Total		174,69	100,00		4,93

Tabela 5.4 – Cobertura por modulação no cenário A

A coluna “Capacidade” da tabela 5.4 é obtida através do produto entre a capacidade útil da modulação nesta banda de frequências (Tabela 2.5) com a respectiva percentagem de área coberta.

Neste momento, como já foi calculada a área total da célula, o número de utilizadores é então resultado do produto entre área total e densidade de utilizadores. A curva seguinte (Fig. 5.6) mostra qual o número de utilizadores deste cenário que uma célula deste tipo tem capacidade para servir.

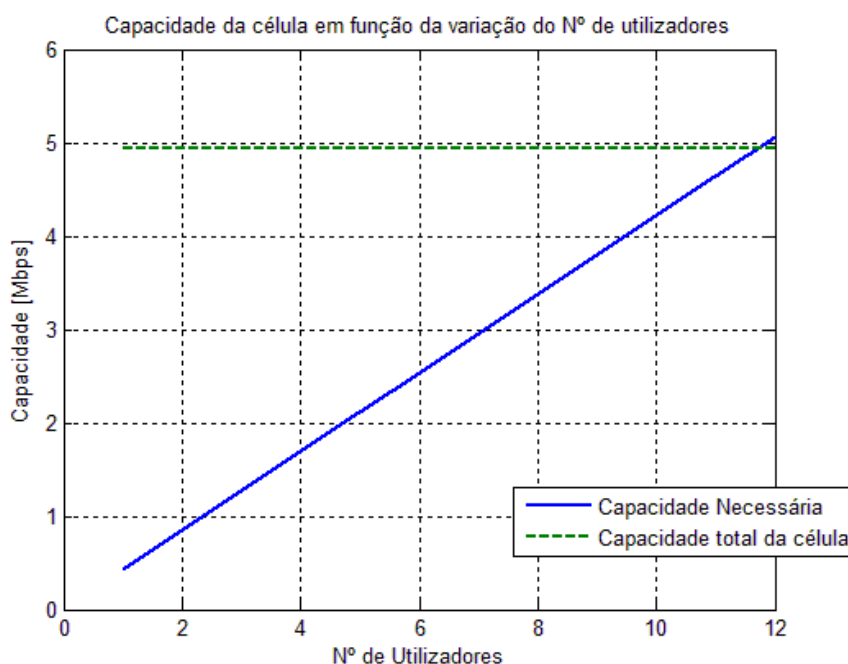


Fig.5.6 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário A)

Através do gráfico da figura 5.6 conclui-se que este sistema tem uma capacidade para servir no máximo 11 utilizadores, num cenário com uma densidade de 0.063 utilizadores por km^2 . Este é, portanto, o valor máximo de densidade de utilizadores que esta célula poderia suportar. Apesar de se tratar de um cenário rural, é legítimo pensar que esta célula poderá não ser suficiente. Assim, poderá ser posta em prática a técnica já referida anteriormente: Sectorização. Esta solução, ilustrada na figura 5.7, irá produzir um aumento na capacidade da célula, o que se irá traduzir na possibilidade de poder servir um número maior de utilizadores por km^2 .

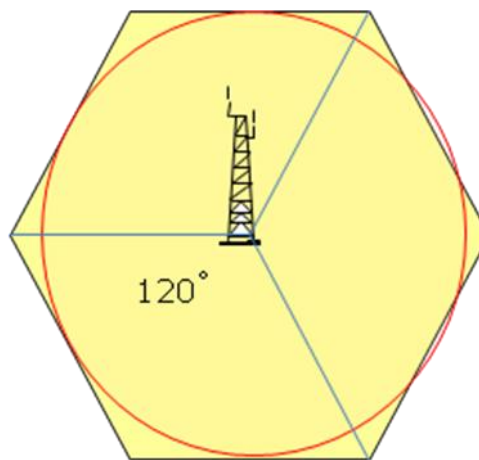


Fig.5.7 – BS com 3 sectores

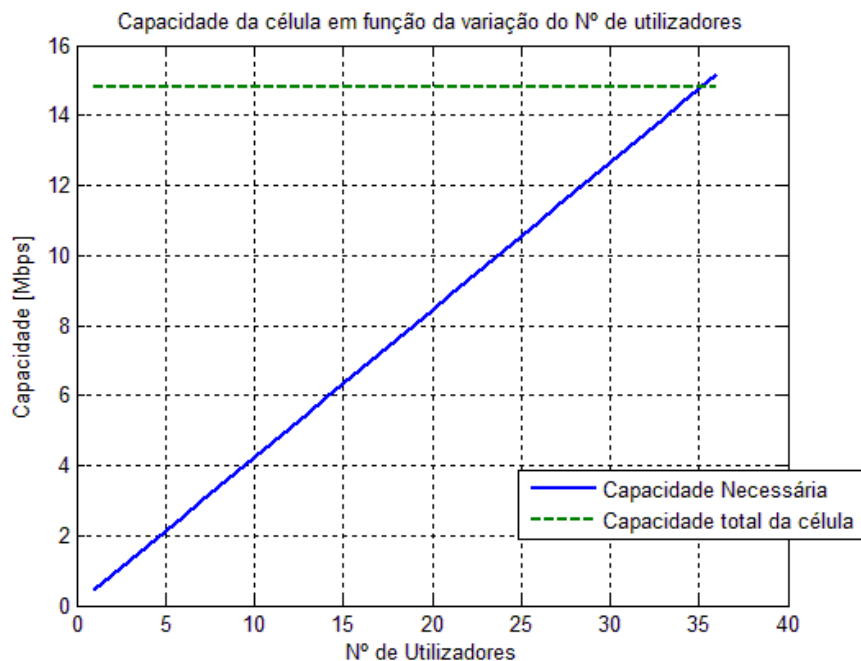


Fig.5.8 – Capacidade da célula sectorizada em função do número de utilizadores (Cenário A)

Através da comparação entre as figuras 5.6 e 5.8, verifica-se que a eficiência da célula aumentou consideravelmente, já que agora é possível servir um maior número de clientes, com a mesma área de cobertura que anteriormente.

No entanto não se tem informações suficientes acerca da área que se vai cobrir. Assim, é pertinente mostrar o efeito que a variação das dimensões da célula tem tanto na capacidade como no alcance obtido. Ou seja, se a célula for projectada para apenas utilizar certas modulações, isso vai-se repercutir negativamente no alcance obtido e, conseqüentemente, na área de cobertura. Por outro lado, obtém-se uma melhoria significativa no que concerne à capacidade da célula. Os gráficos seguintes ilustram isso mesmo, dando uma ideia das possibilidades que se poderão ter ao manipular estes parâmetros, no planeamento de uma rede celular WiMAX.

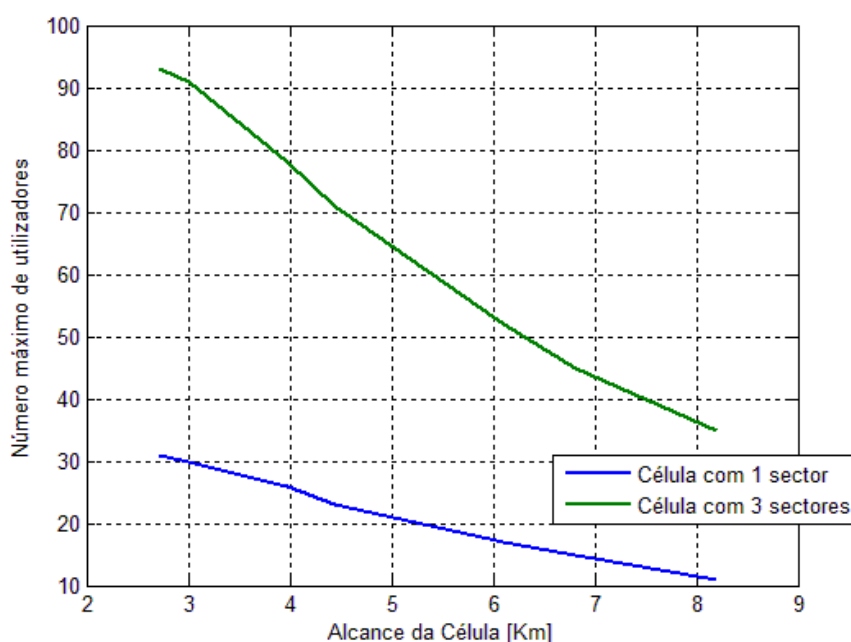


Fig.5.9 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário A)

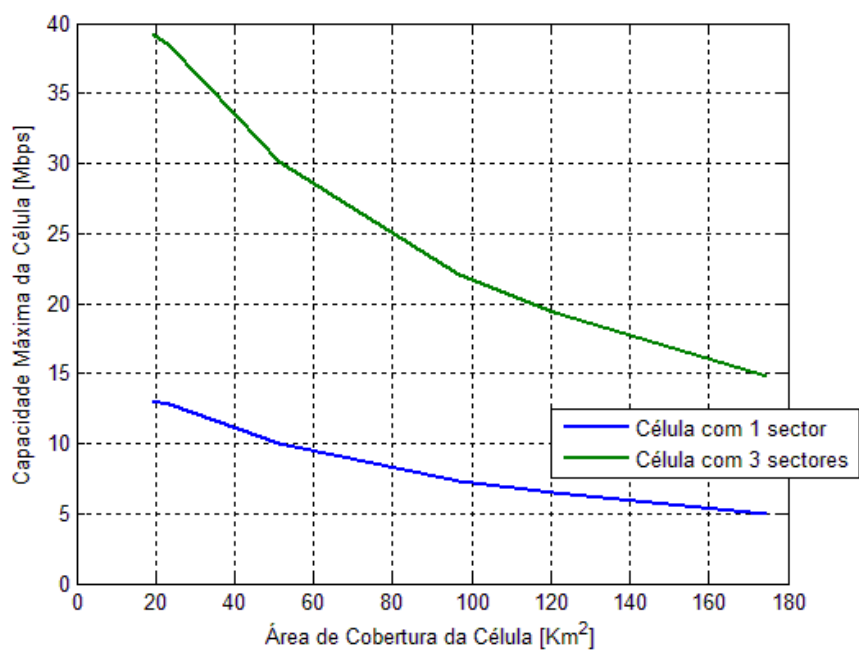


Fig.5.10 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário A)

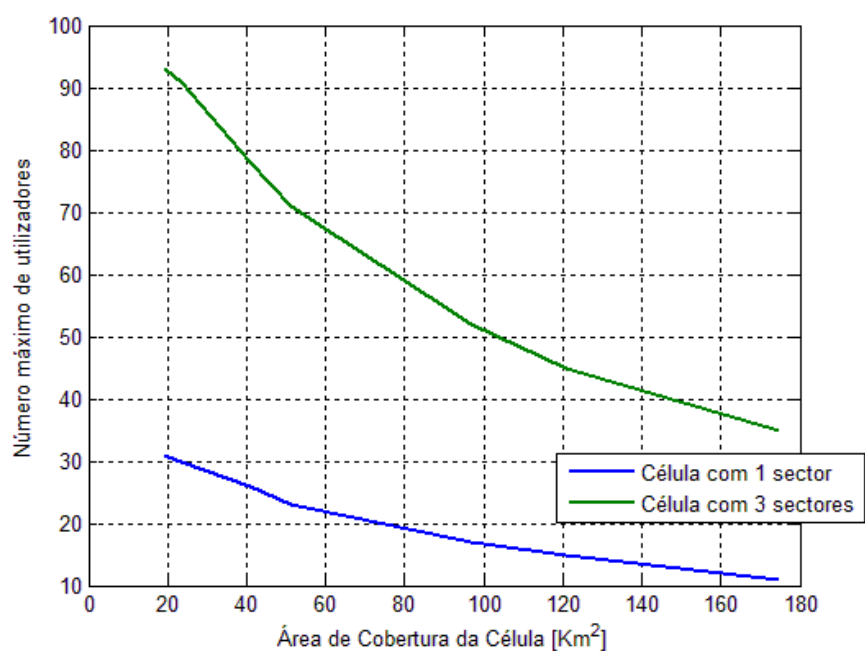


Fig.5.11 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário A)

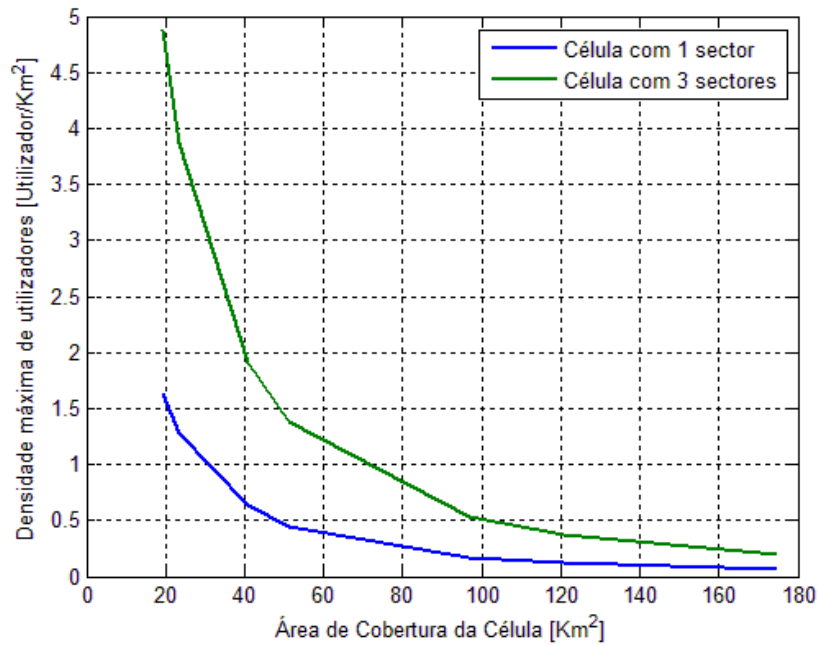


Fig.5.12 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário A)

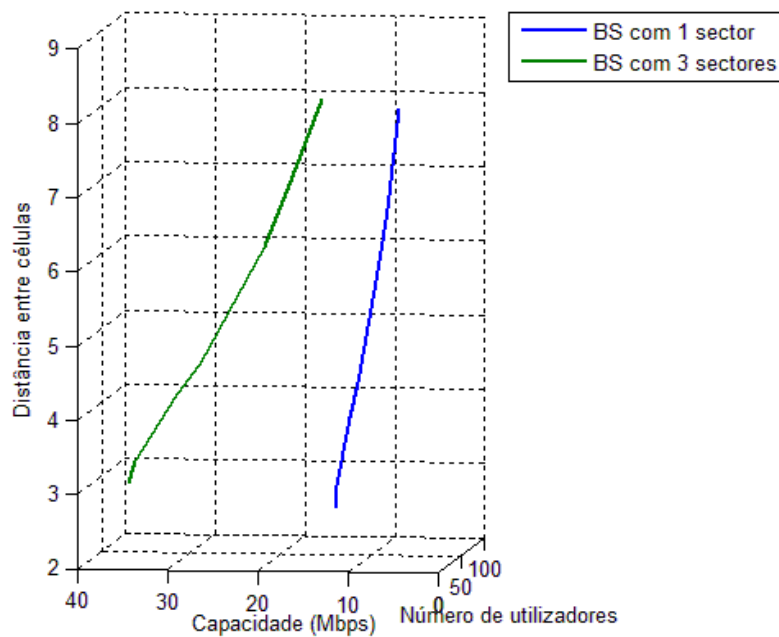


Fig.5.13 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células

Todos estes gráficos ajudam a perceber que há diversas variáveis em jogo quando se planeia uma rede WiMAX com estrutura celular. Dependendo do caso

específico, podem-se manipular diversos factores para encontrar a solução que melhor se ajuste ao caso. Se por um lado a prioridade for o alcance, o aumento da capacidade pode ser obtido através da técnica da sectorização. Por outro lado, pode-se optar por diminuir o alcance e com isso aumentar a capacidade da célula, o que irá diminuir os custos inerentes à sectorização.

5.2.2. Cenário B (Urbano Residencial)

À semelhança do que foi feito no cenário anterior, começa-se por atribuir alguns valores típicos a constantes que são necessárias para a obtenção de resultados, que estão presentes na tabela 5.5.

Parâmetro	Valor
BW	5 MHz
P_T	30 dBm
G_T	16 dBi
G_R	18 dBi
h_r	2 m
h_b	35 m
L_s	1.1 dB

Tabela 5.5 – Valores usados para simulação no cenário B

Este cenário não é semelhante ao anterior, na medida em que aqui o planeamento celular deve ser feito ao nível da capacidade por célula em detrimento da área da mesma. Isso é óbvio uma vez que a densidade de utilizadores para um cenário deste tipo será, em princípio, mais elevada do que no caso anterior, o que irá fazer com que a necessidade de capacidade seja maior. Já a pensar nisso opta-se por utilizar canais de largura de banda maior, isto é, 5 MHz em vez de 3.5 MHz. O tipo de terreno considerado é o suburbano.

Modulação	Distâncias [km]	Área Coberta [km ²]	% coberta	Área	Capacidade [Mbps]
BPSK 1/2	3,39	8,28	27,69		0,58
QPSK 1/2	2,89	3,82	12,78		0,53
QPSK 3/4	2,62	7,65	25,59		1,59
16-QAM 1/2	1,98	1,79	6,00		0,50
16-QAM 3/4	1,79	3,22	10,76		1,34
64-QAM 2/3	1,41	0,86	2,88		0,48
64-QAM 3/4	1,28	4,28	14,29		2,67
Total		29,91	100,00		7,69

Tabela 5.6 – Cobertura para cada modulação no cenário B

Uma célula com estas características tem uma cobertura de 29.91 Km² e capacidade máxima de 7.69Mbps, como mostra a tabela 5.6.

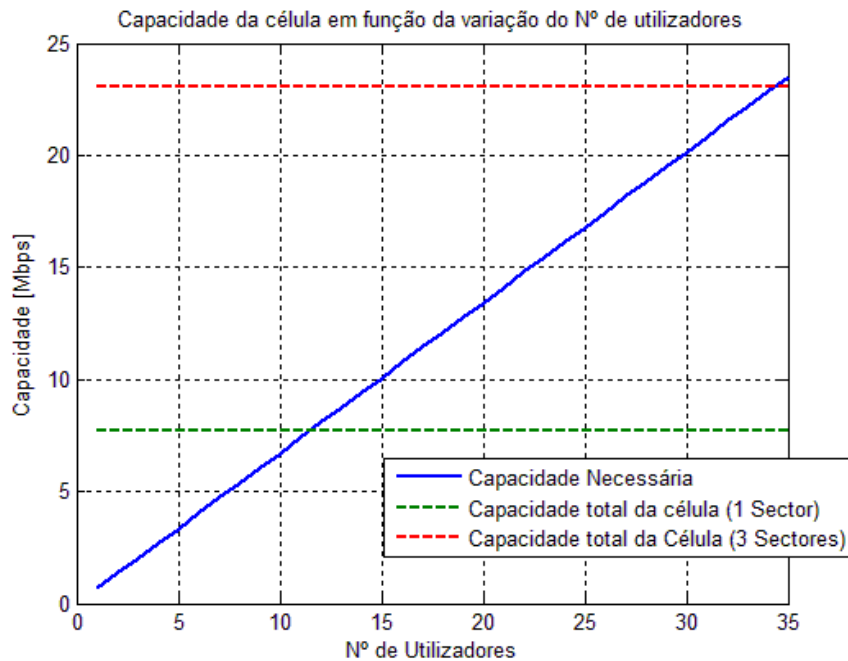


Fig. 5.14 - Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário B)

Depois do estudo feito no cenário anterior, optou-se por já mostrar a capacidade por célula neste cenário, para células de 1 e 3 sectores. Tal como anteriormente, o recurso a células de 3 sectores aumenta consideravelmente a eficiência da mesma, já que regista um aumento da capacidade e, por conseguinte, torna-se possível servir uma maior densidade de utilizadores. A figura 5.14 mostra isso mesmo.

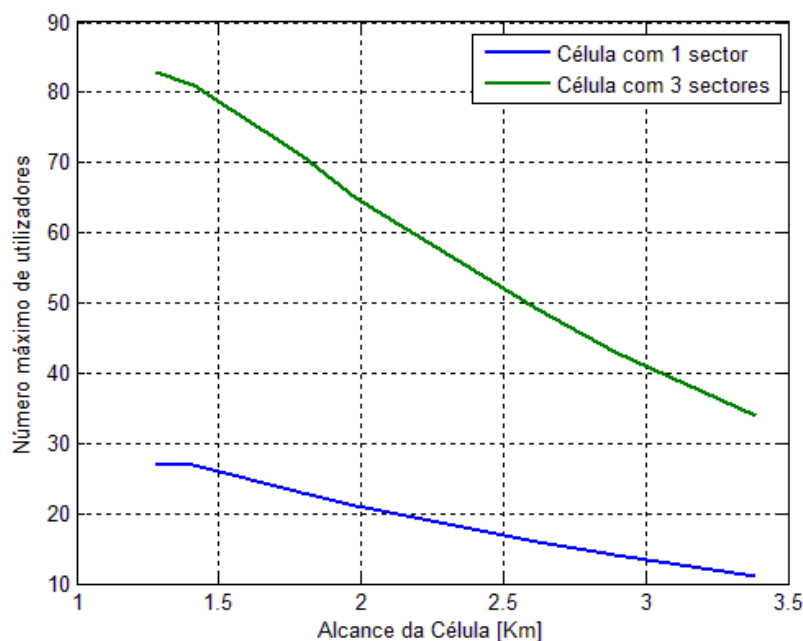


Fig.5.15 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário B)

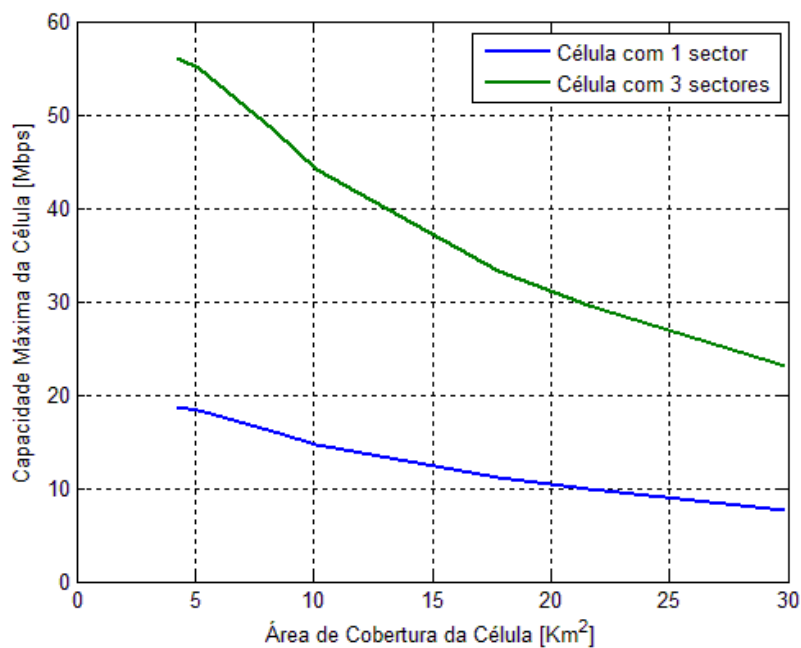


Fig.5.16 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário B)

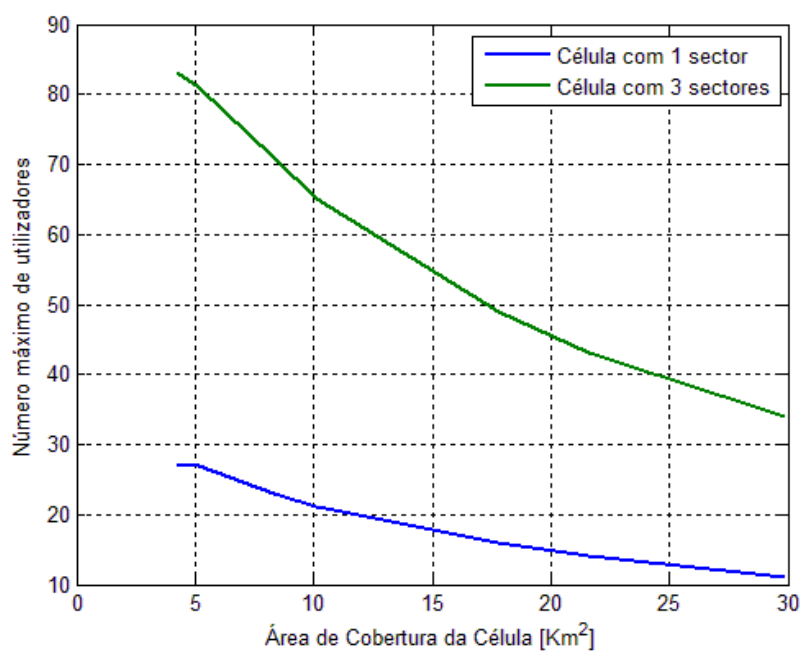


Fig.5.17 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário B)

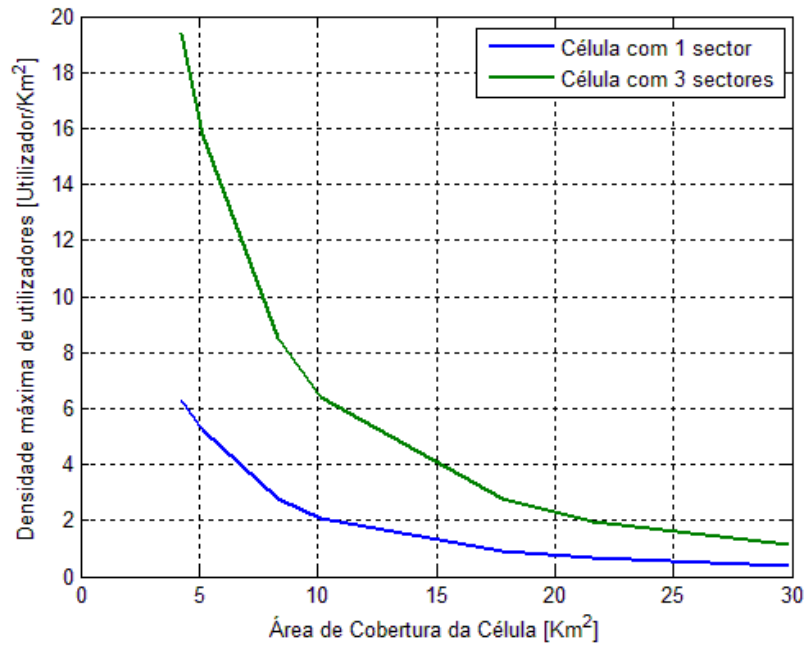


Fig.5.18 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 setores (Cenário B)

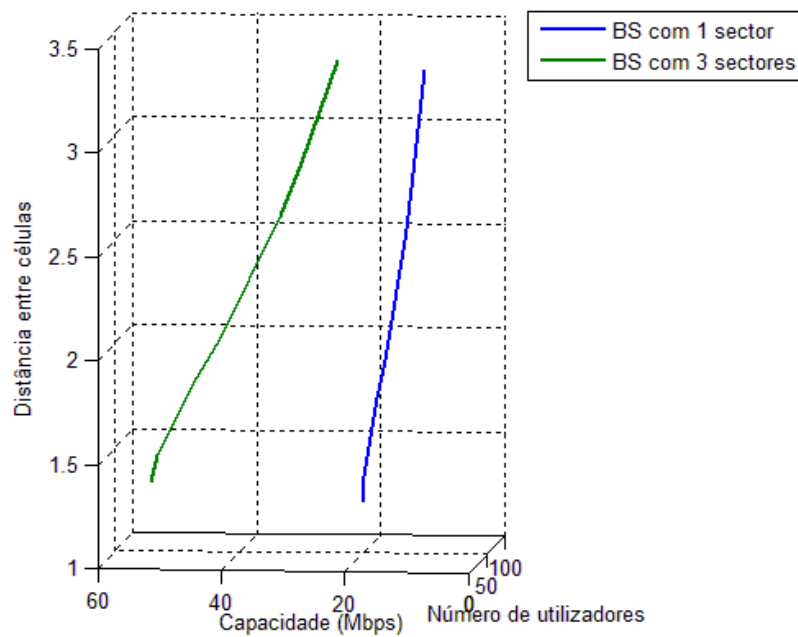


Fig.5.19 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células (Cenário B)

Este cenário foi idealizado como sendo tipicamente uma zona residencial. Isso reflectiu-se no alcance, que relativamente ao caso anterior foi inferior. Já a densidade de utilizadores também será maior, o que alerta para a necessidade de um planeamento bastante cuidado. Como foi possível de visualizar através dos

gráficos apresentados, o aumento de alcance de uma célula paga-se caro com a diminuição da capacidade da mesma. Se, por um lado, for conhecida a densidade de utilizadores deste cenário, remetendo ao gráfico 5.18 poderá encontrar-se a melhor alternativa para responder às necessidades deste cenário.

Em suma, a análise dos gráficos 5.15 a 5.19 ajuda a encontrar um ponto de equilíbrio entre as várias variáveis que influenciam o planeamento de uma rede WiMAX. Se a prioridade for o alcance da célula, poderá conseguir-se aumento da capacidade através da implementação da técnica da sectorização. Se, mesmo assim, a densidade de utilizadores servidos não for suficiente, poderá actuar-se sobre o alcance da célula, já que a sua redução proporciona aumento da capacidade.

5.2.3. Cenário C (Urbano Empresarial)

Neste cenário considera-se que o tipo de terreno é o mesmo que o caso anterior – suburbano – logo os resultados são idênticos. A diferença reside no tipo de tráfego e tipo de necessidades inerentes ao mesmo, já que se trata de um uso empresarial. Assim, em relação aos parâmetros de simulação, estes são iguais aos do cenário anterior (B). A tabela que nos dá a cobertura desta célula, para cada modulação é, então, igual ao caso anterior (tabela 5.5).

Modulação	Distâncias [km]	Área Coberta [km ²]	% Área coberta	Capacidade [Mbps]
BPSK 1/2	3,39	8,28	27,69	0,58
QPSK 1/2	2,89	3,82	12,78	0,53
QPSK 3/4	2,62	7,65	25,59	1,59
16-QAM 1/2	1,98	1,79	6,00	0,50
16-QAM 3/4	1,79	3,22	10,76	1,34
64-QAM 2/3	1,41	0,86	2,88	0,48
64-QAM 3/4	1,28	4,28	14,29	2,67
Total		29,91	100,00	7,69

Tabela 5.7 – Cobertura para cada modulação no cenário C

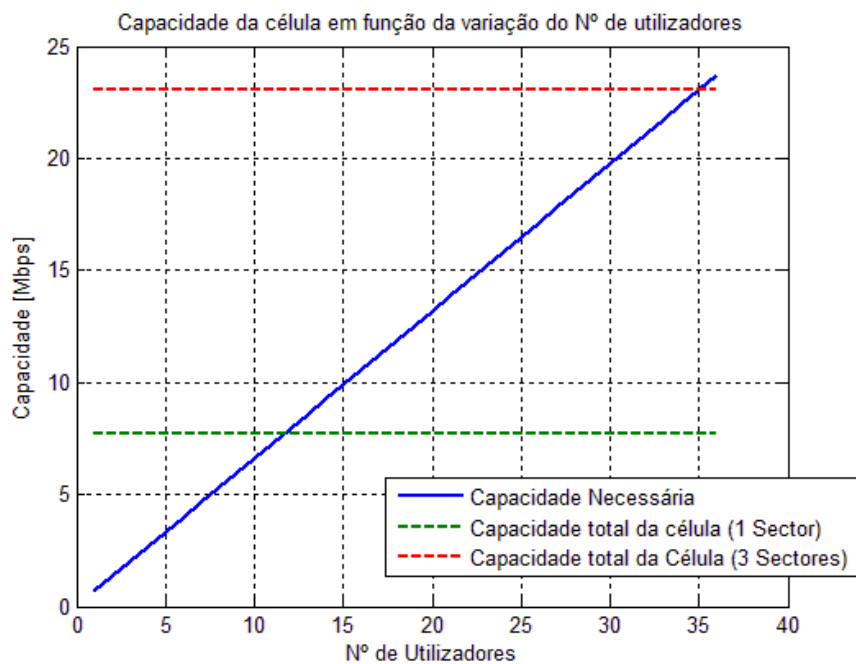


Fig.5.20 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário C)

As necessidades de capacidade deste cenário são bastante semelhantes ao caso anterior, logo não se esperam diferenças de maior.

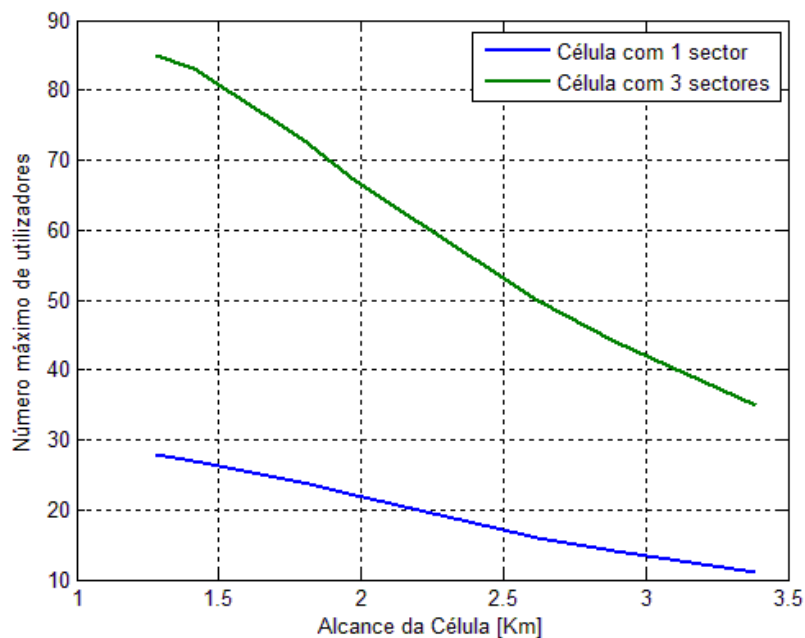


Fig.5.21 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário C)

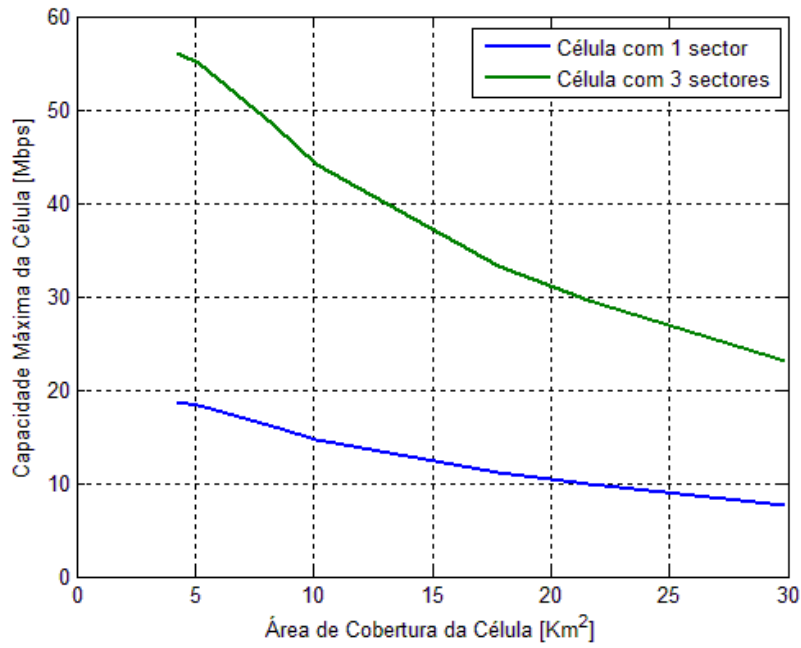


Fig.5.22 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário C)

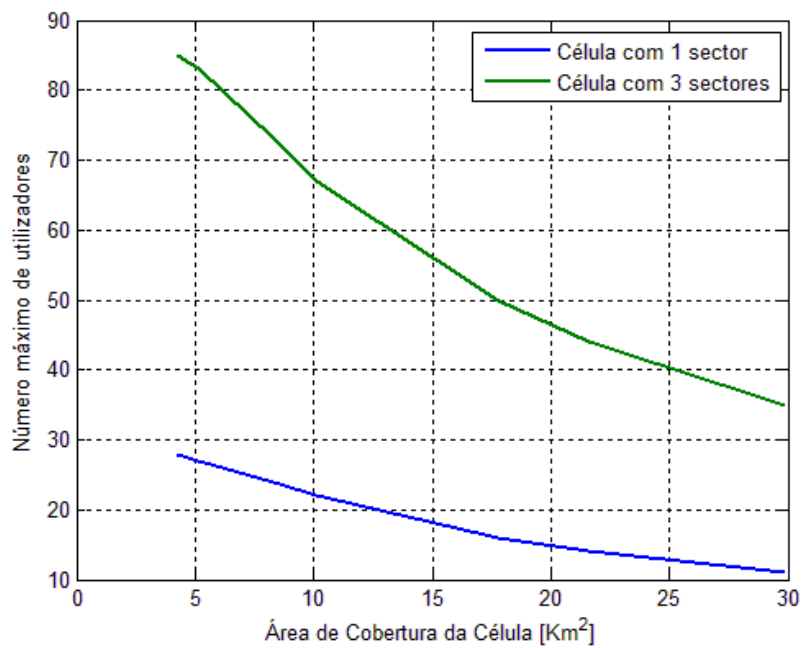


Fig.5.23 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário C)

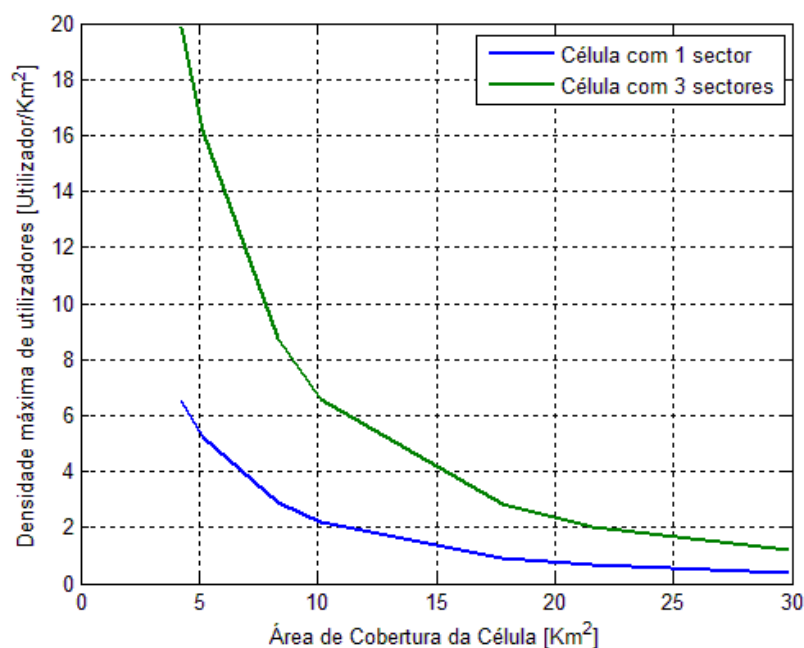


Fig.5.24 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário C)

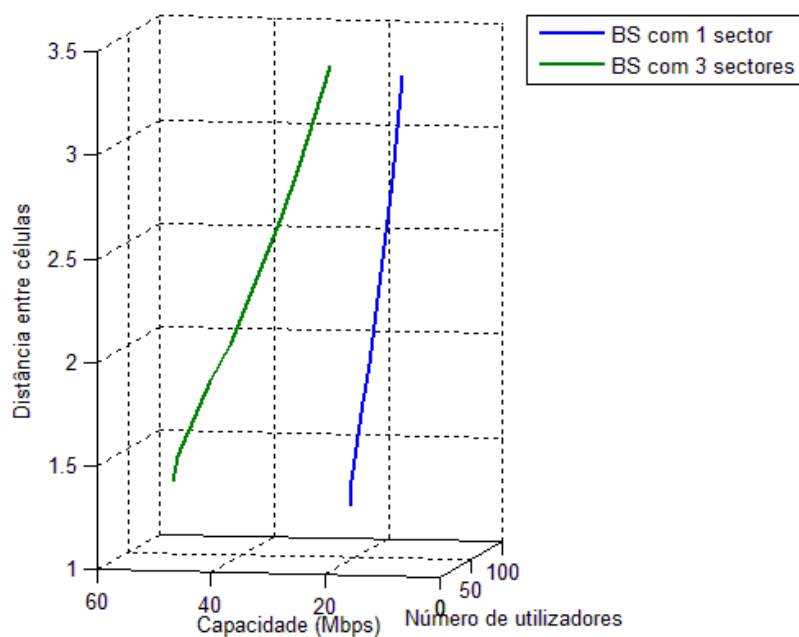


Fig.5.25 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células (Cenário C)

Este cenário tal como se previra é bastante semelhante ao cenário B, até por ter sido considerado como tendo o mesmo tipo de terreno. O que difere está relacionado com o número de utilizadores, na medida em que as necessidades empresariais são diferentes das residenciais.

A análise dos gráficos 5.21 a 5.25 permite a escolha da melhor opção que relaciona as várias variáveis que estão envolvidas no processo do planeamento celular. O facto deste cenário ser tipicamente empresarial é um aspecto bastante importante, já que os seus utilizadores serão bastante exigentes. Isto leva a pensar que neste caso a capacidade deverá ser favorecida em detrimento do alcance. No entanto, existe a possibilidade de obter aumento de capacidade através da técnica de sectorização, sem o alcance ser afectado.

5.2.4. Cenário D (Urbano Misto)

Este cenário é tipicamente urbano, na medida em que se considera um terreno bastante acidentado (Tipo A, modelo SUI), com uma densidade bastante elevada de utilizadores, com necessidades residenciais e empresariais. Os valores utilizados em simulação, neste caso, são apresentados na tabela 5.8.

Parâmetro	Valor
BW	5 MHz
P_T	25 dBm
G_T	16 dBi
G_R	18 dBi
h_r	2 m
h_b	50 m
L_s	1.1 dB

Tabela 5.8 – Valores usados para simulação no cenário D

Os resultados de alcance, área de cobertura e capacidade são apresentados na tabela 5.9.

Modulação	Distâncias [km]	Área Coberta [km ²]	% coberta	Área	Capacidade [Mbps]
BPSK 1/2	1,32	1,21	26,56		0,55
QPSK 1/2	1,13	0,56	12,41		0,52
QPSK 3/4	1,03	1,15	25,28		1,57
16-QAM 1/2	0,79	0,28	6,04		0,50
16-QAM 3/4	0,72	0,50	11,00		1,37
64-QAM 2/3	0,57	0,14	3,00		0,50
64-QAM 3/4	0,52	0,71	15,70		2,94
Total		4,55	100,00		7,95

Tabela 5.9 – Cobertura para cada modulação no cenário C

Neste terreno as perdas de percurso condicionam bastante as dimensões da célula, que neste caso são bastante mais reduzidas que nos cenários anteriores.

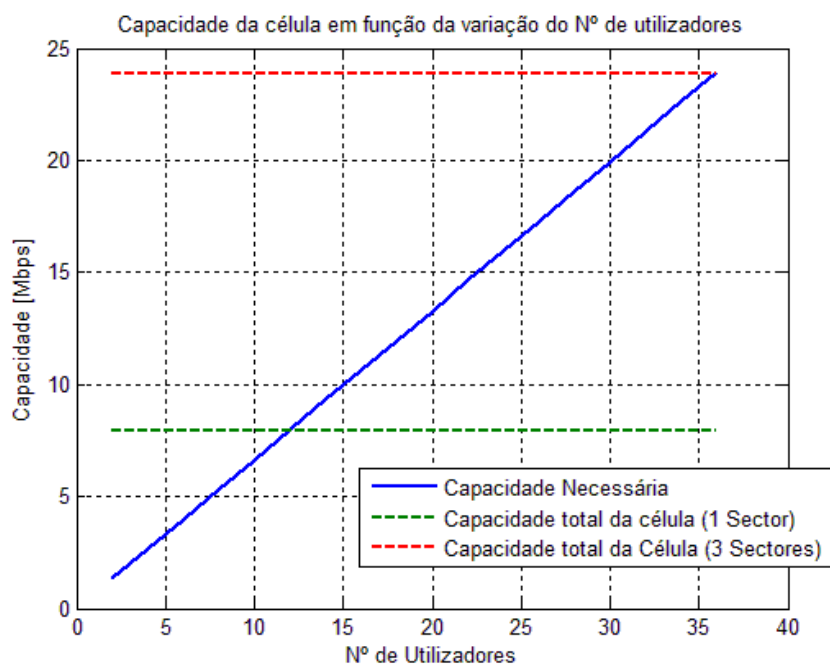


Fig.5.26 – Capacidade da célula em função do número de utilizadores (Cenário D)

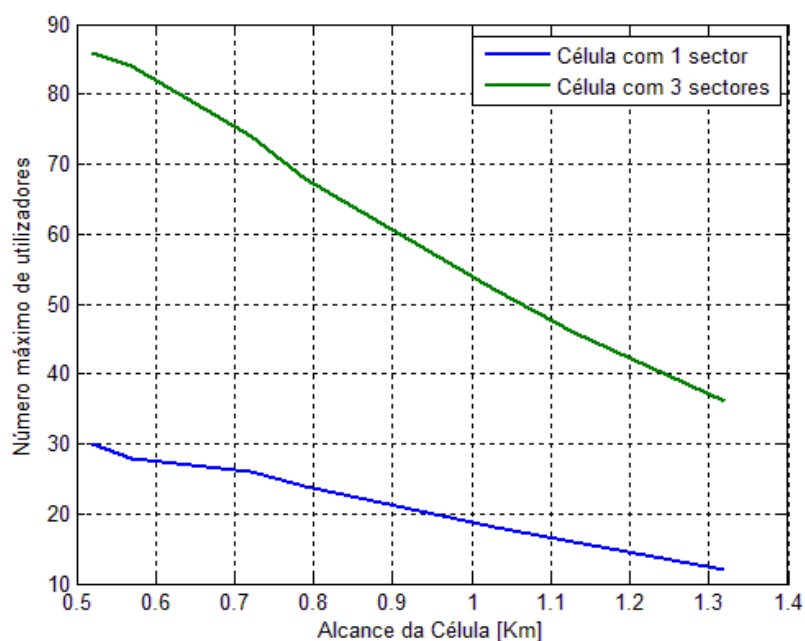


Fig.5.27 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com o alcance da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário D)

De notar que se está a considerar que metade dos utilizadores são do tipo empresarial e metade são do tipo residencial.

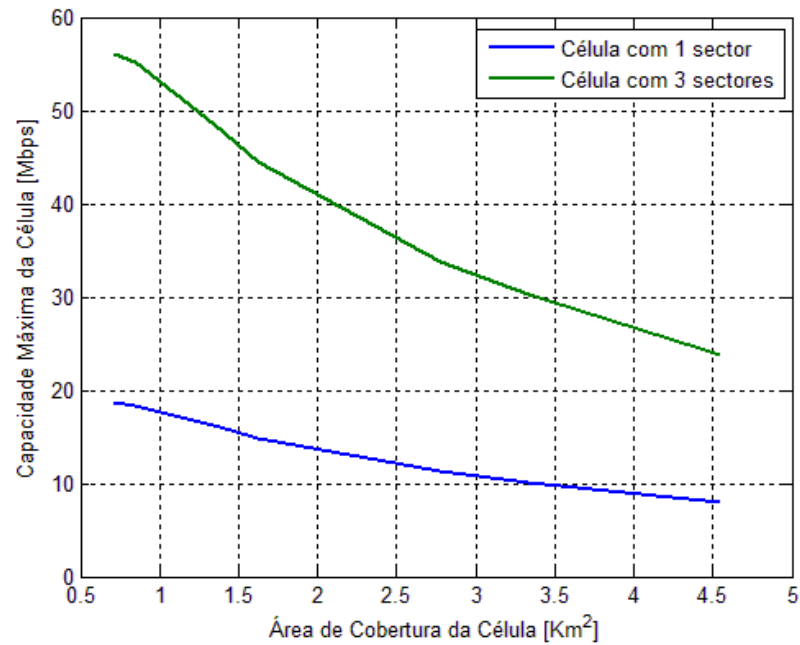


Fig.5.28 – Gráfico da variação da capacidade máxima suportada pela célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário D)

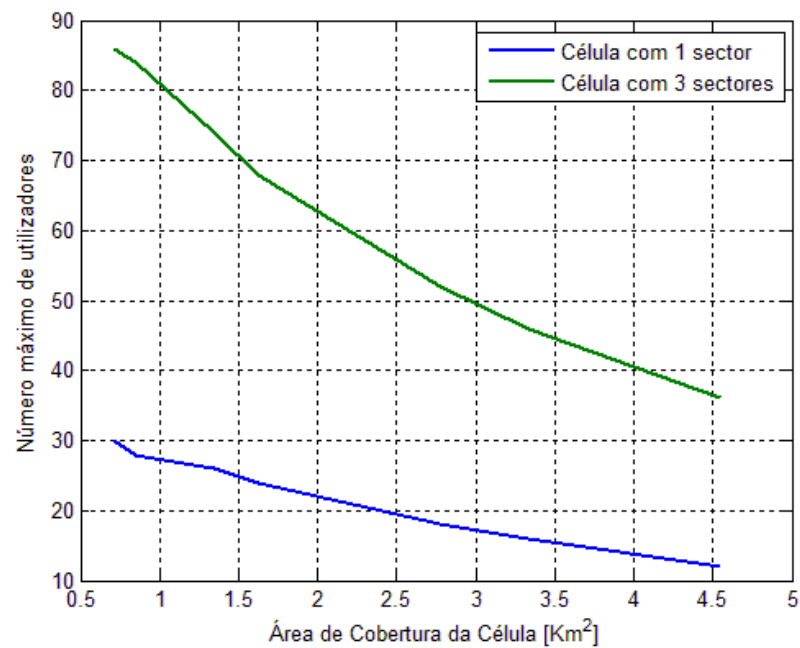


Fig.5.29 – Gráfico da variação do Número Máximo de utilizadores suportado por uma célula com a área de cobertura da mesma, para células com 1 e 3 sectores (Cenário D)

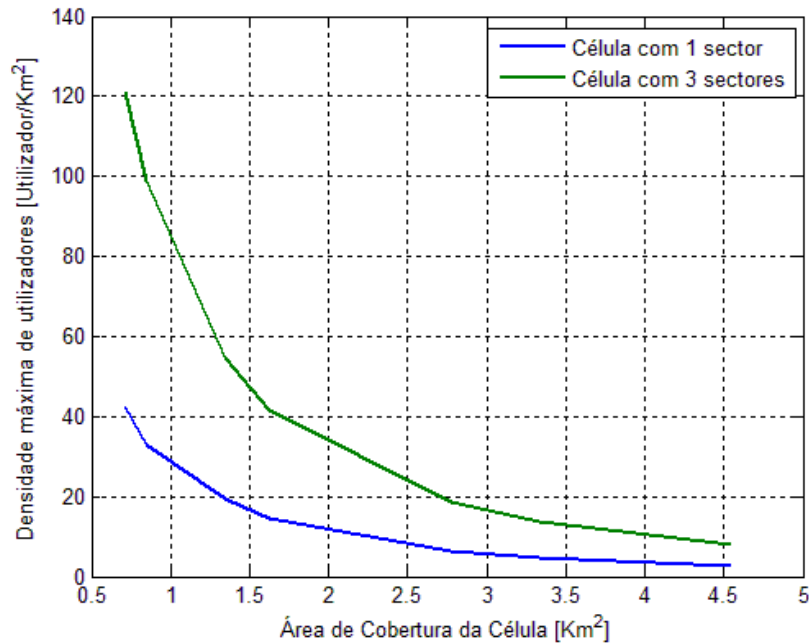


Fig.5.30 – Gráfico da variação da densidade máxima suportada por uma célula, para células de 1 e 3 sectores (Cenário D)

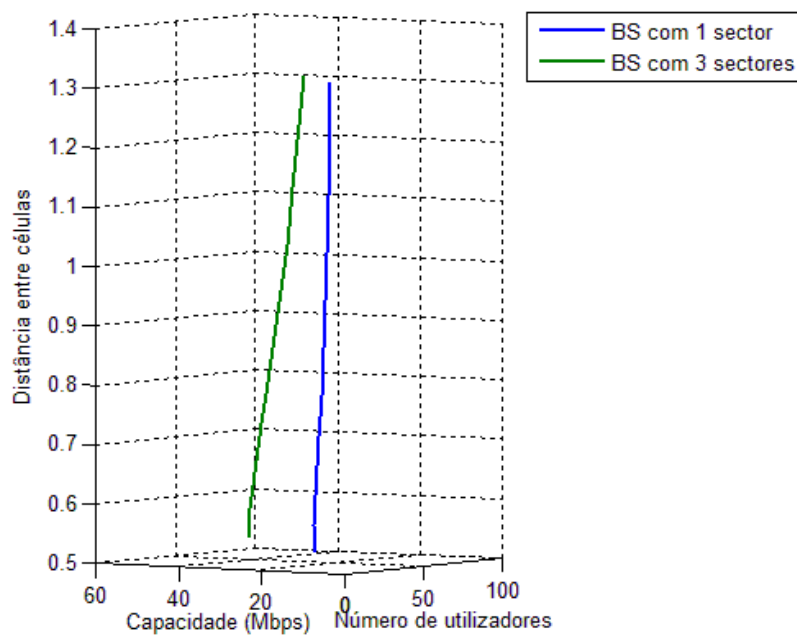


Fig.5.31 – Gráfico 3D que mostra a relação entre capacidade, número de utilizadores e distância entre células (Cenário D)

Tal como nos cenários anteriores, através da análise dos gráficos 5.27 a 5.31 é possível encontrar a solução melhor no que diz respeito à manipulação dos diversos factores envolvidos no planeamento celular. Tendo em conta de que este cenário terá uma grande densidade de utilizadores, é legítimo pensar que o seu requisito em termos de capacidade será maior, tendo que ser favorecido em detrimento da área de cobertura da célula.

Neste cenário verifica-se, no entanto, uma menor área de cobertura devido ao tipo de terreno considerado – urbano. Isso exige reflexão na medida em que a área de cobertura de uma célula representa uma percentagem pequena em relação à área metropolitana de uma cidade. Ou seja, é necessário planejar não só uma célula mas sim um conjunto de células. Isto obriga a pensar na reutilização de frequências, isto é, fazer o planeamento celular tendo em conta as frequências de cada célula, para que não haja interferências entre si. Os sistemas mais complexos exigem um factor de reutilização da frequência de 7, ou seja, 7 frequências distintas. No entanto, um factor de reutilização da frequência de 3 é bastante mais simples e será suficiente para a complexidade deste cenário. Também tem que se ter em linha de conta aspectos relacionados com o espectro disponível, já que não se podem utilizar mais canais do que os permitidos pela entidade reguladora.

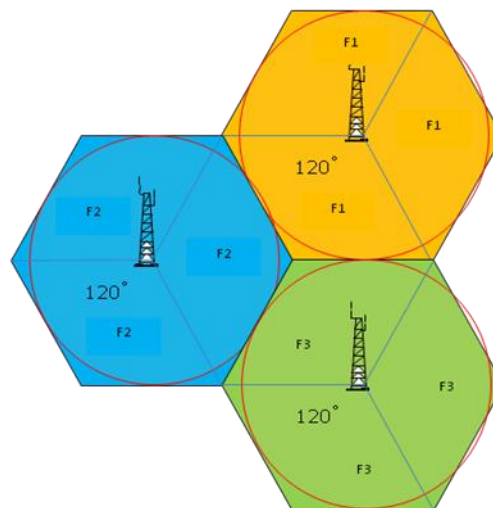


Fig. 5.32 – Possível implementação de uma rede WiMAX com factor de reuso de 3

Na figura anterior está representada uma possível implementação de uma rede celular WiMAX com factor de reutilização da frequência de 3. Neste caso, duas células com a mesma frequência estariam à distância de $D = R\sqrt{3k}$, em que k neste caso é 3 (factor de reutilização da frequência) e R é o alcance da célula, para garantir que qualquer interferência seja desprezável.

Restaria agora planejar o número de células para este cenário consoante a área que seria necessário abranger, bem como a densidade de utilizadores da mesma.

5.3. Sumário

Neste capítulo apresentaram-se soluções para os 4 cenários de utilização que foram idealizados no âmbito desta dissertação. Este estudo consistiu em definir cada cenário, e posteriormente definir o perfil de utilizador para cada cenário. De seguida efectuou-se o cálculo das distâncias para cada modulação, de onde é possível retirar a área da célula. Com a introdução dos cálculos para a obtenção da capacidade por célula foi então possível comparar este valor com o obtido como requisito. Assim, foram apresentadas soluções para suprir as carências de cada um destes cenários.

6. Ferramenta de Planeamento de Redes WiMAX

Até este ponto, todos os cálculos efectuados foram feitos utilizando várias plataformas, de forma não automatizada. No entanto, para fazer um correcto planeamento de uma rede, de acordo com os cenários em questão, justifica-se a criação de uma ferramenta que simplifique, automatize e generalize todo este processo.

Um dos objectivos deste trabalho prende-se com a realização de uma aplicação cuja função é ajudar no planeamento de uma rede WiMAX, através da criação de um algoritmo eficiente, apresentando uma solução para a implementação da rede, tendo como entrada qualquer cenário.

Assim, este capítulo será iniciado através de uma pequena introdução onde será abordada de forma simplificada a estrutura da aplicação. Na secção 6.2 é explicada a estrutura já de forma mais detalhada. A secção 6.3 é dedicada à apresentação de resultados obtidos através do uso da ferramenta desenvolvida.

6.1. Introdução

Para efectuar este planeamento, é necessário ter em linha de conta uma série de aspectos, bem como seguir todos os passos de forma faseada. Este processo pode ser dividido em 3 fases principais: Dimensionamento, Planeamento e Optimização.

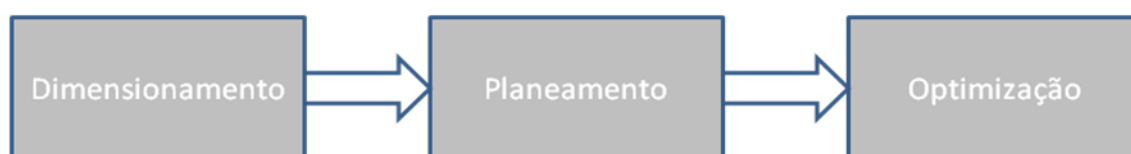


Fig. 6.1 – Fases de planeamento de uma rede celular

No que diz respeito à fase de dimensionamento, esta consiste na introdução por parte do utilizador dos dados importantes de entrada. Os dados a introduzir referem-se tanto a características que modelam o tráfego, como também se referem a características importantes para o dimensionamento físico da célula.

Na fase de planeamento, os dados que foram anteriormente introduzidos são tratados. Inicialmente caracterizando o tráfego em termos de requisitos de capacidade e também caracterizando a propagação do sinal rádio. Posteriormente, o dimensionamento das células será feito mediante a

combinação de alguns factores, cálculos efectuados, as especificações do utilizador e também as soluções tecnológicas existentes.

Por último, a fase de optimização terá lugar após o resultado apresentado pela ferramenta. Esta fase permite que o utilizador faça alguns ajustes no resultado obtido, optando por outro tipo de solução que julgue ser mais conveniente.

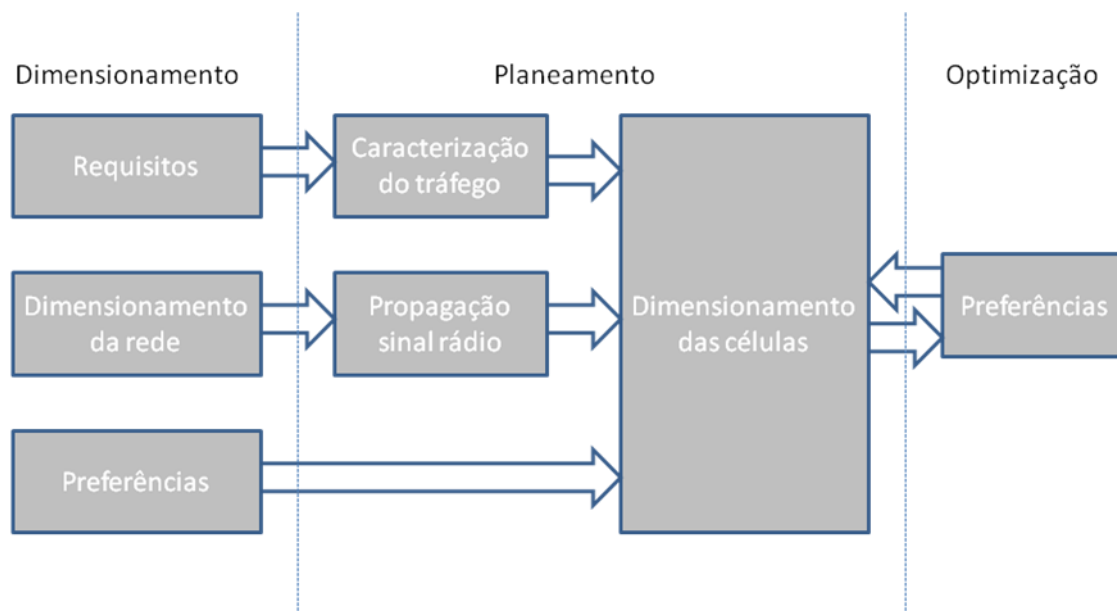


Fig. 6.2 – Diagrama simplificado do planeamento de uma rede celular

6.2. Estrutura da aplicação

A aplicação foi concebida para efectuar todos os passos necessários à planificação de uma célula WiMAX, seguindo os passos descritos no capítulo anterior. Possui um *design* simples e intuitivo, permitindo ao utilizador obter de forma bastante rápida e simples os cálculos para uma célula WiMAX.

O interface com o utilizador é feito basicamente em dois formulários. O formulário inicial consiste na recolha de toda a informação que é necessária para a execução dos cálculos. No separador principal, o utilizador selecciona qual o tipo de terreno em que pretende implementar a rede. Para além disso também terá que introduzir quais os requisitos que cada serviço deve ter. Estão já introduzidos nestes campos valores por defeito, concordantes com os já apresentados no capítulo 4. No separador seguinte, o utilizador tem a possibilidade de definir os perfis de utilizadores que pretende “colocar” na sua rede. Pode, assim, seleccionar utilizadores residenciais e/ou utilizadores empresariais. Aqui poderá também, para cada tipo de utilizador e para cada

serviço, definir a periodicidade das utilizações, bem como a duração de cada uma, tanto para horário diurno como nocturno. O preenchimento destes campos é fundamental para a obtenção da intensidade de tráfego, que irá ser fundamental para a caracterização dos requisitos do serviço. Ao seleccionar cada tipo de utilizador, fica também activa a possibilidade de definir qual a densidade dos mesmos (utilizador por km²). Por último, o terceiro separador permite ao utilizador definir aspectos fundamentais na tecnologia a implementar. Aqui é possível definir o rácio entre *downlink* e *uplink*, bem como outros parâmetros, tais como as alturas das antenas emissora e receptora, ganhos do sistema, entre outros. Existem algumas opções que estão desactivadas por defeito, que são a possibilidade de optar entre WiMAX Fixo e Móvel e opções ao nível da tecnologia, que são a possibilidade de escolher SIMO, MIMO e *Adaptive Beamforming*. A razão pela qual é impossível seleccionar estas opções prende-se com o facto de não ter sido ainda implementada a parte móvel, ficando essa possibilidade em aberto.

Neste formulário foram implementadas também algumas soluções que têm meramente em perspectiva a simplificação de processos para o utilizador. São elas a possibilidade de guardar e posteriormente carregar as definições do programa.

Após estar completa a introdução de todos os dados neste formulário, o cálculo é feito noutro formulário. O programa inicialmente irá apresentar uma solução para o problema. A solução apresentada tem como critério principal o custo mais baixo de implementação. Ou seja, dentro de todas as possibilidades de servir estes clientes, o programa irá apresentar uma solução tendo em conta dois critérios principais: o principal é o menor número de sectores, enquanto o secundário é o menor tamanho dos canais. No entanto esta solução não é vinculativa, na medida em que o utilizador poderá fazer diversos ajustes, sendo imediatamente apresentado o efeito que esse ajuste irá fazer. Os ajustes são feitos em *trackbars*, sendo que uma horizontal permite alterar o alcance da célula. Já através de uma *trackbar* vertical irão ser efectuados ajustes ao nível do tamanho dos canais. O número de sectores que a célula terá, também pode ser alterado.

6.3. Funcionamento

Na secção anterior já foi apresentada a aplicação de um modo geral. Aqui será dada uma explicação mais aprofundada.

Antes de mais, a linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento deste programa foi C#. A razão pela escolha desta linguagem prende-se com algumas das potencialidades que apresenta, sendo que a principal foi o facto de permitir o uso de *arrays* multidimensionais. Ou seja, por exemplo a linguagem C (ou C++), permite o uso de *arrays* de apenas uma dimensão, sendo que o utilizador pode contornar esta situação ao criar um *array* composto por elementos em que sejam todos eles do tipo *array* também. No entanto, em C#, um array poderá ser criado de raíz com as dimensões desejadas. Neste caso, como já estavam desenvolvidas diversas funções em MATLAB que lidavam directamente com variáveis matriciais de dimensões [MxN], seria mais fácil a sua adaptação para a linguagem C#, já que a mesma suporta este tipo de variáveis.

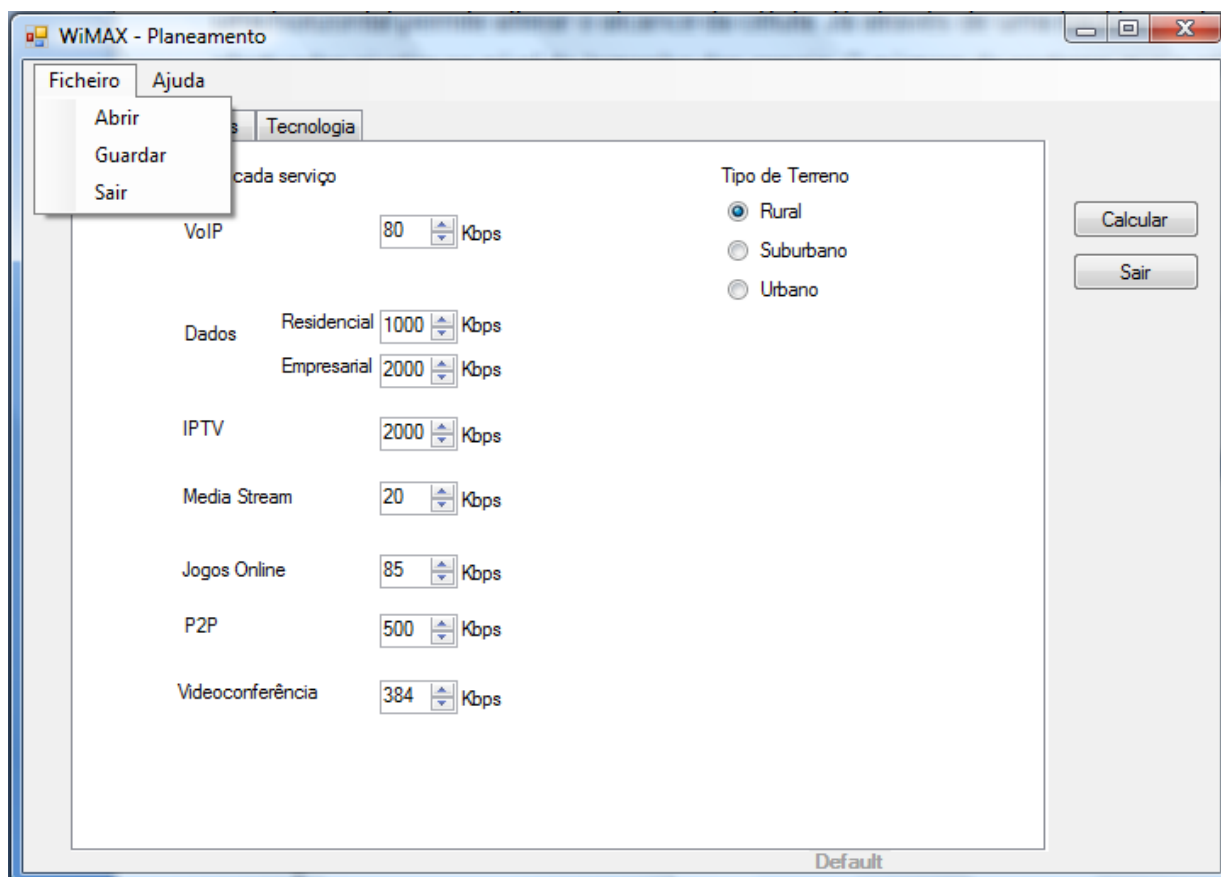


Fig. 6.3 – Vista da janela inicial da ferramenta de planeamento de uma rede WiMAX

Na figura 6.3 apresenta-se a janela inicial da aplicação desenvolvida. Tal como já foi dito anteriormente, é possível ao utilizador configurar os diversos

serviços, preenchendo os espaços com os requisitos que cada serviço terá. No caso do serviço de dados, tal como já foi considerado no capítulo 4, é feita a distinção entre residencial e empresarial, para realçar que neste campo específico poderá haver diferentes necessidades de largura de banda. É possível seleccionar também o tipo de terreno que mais se ajuste às necessidades, podendo optar entre cada um dos 3 tipos de terreno definidos pelo modelo SUI.

As opções de Guardar e Abrir permitem que sejam guardadas num ficheiro todas as preferências do utilizador. A função guardar não faz mais que percorrer todos os campos existentes neste programa: *NumericUpdowns*, *checkboxs* e *Radios*, guardando tudo no ficheiro especificado anteriormente. Obviamente, a função Abrir irá preencher todos estes campos com os dados previamente guardados em ficheiro.

The screenshot shows the 'WiMAX - Planeamento' application window with the 'Perfis' tab selected. The interface is divided into two main sections: 'Utilizador Residencial' and 'Utilizador Empresarial'. Each section has a table of usage parameters. The 'Utilizador Residencial' section includes settings for 'Horário Diurno' and 'Horário Noturno' with columns for 'VoIP', 'Dados', 'IPTV', 'Media Stream', 'Jogos Online', and 'P2P'. The 'Utilizador Empresarial' section includes settings for 'Horário Diurno' and 'Horário Noturno' with columns for 'VoIP', 'Dados', and 'Videoconferência'. At the bottom, there are density settings for 'Utilizadores Residenciais' and 'Utilizadores Empresariais'. The 'Default' button is visible at the bottom right of the window.

Utilizador Residencial		VoIP	Dados	IPTV	Media Stream	Jogos Online	P2P
Horário Diurno							
Nº de Utilizações		7	6	2	1	1	1
Duração (minutos)		5	40	60	20	60	30
Horário Noturno							
Nº de Utilizações		2	4	1	0	0	0
Duração (minutos)		5	20	100	0	0	0

Utilizador Empresarial		VoIP	Dados	Videoconferência
Horário Diurno				
Nº de Utilizações		30	20	3
Duração (minutos)		2	10	60
Horário Noturno				
Nº de Utilizações		5	1	0
Duração (minutos)		2	0	0

Densidade de Utilizadores		Utilizadores Residenciais	Utilizadores/Km ²
		1,50	
		Utilizadores Empresariais	Utilizadores/Km ²
		0,50	

Fig. 6.4 – Vista do separador “Perfis” da ferramenta de planeamento de uma rede WiMAX

O separador “Perfis” possui o aspecto da figura 6.4. Aqui o utilizador tem a possibilidade de seleccionar quais os utilizadores que existirão na rede. Para um cenário tipicamente residencial, a escolha apenas recai no Utilizador Residencial. Para cenários empresariais, a escolha recai em Utilizador Empresarial. Existe também a possibilidade de seleccionar os dois tipos de utilizador. Após esta

selecção, cabe ao utilizador seleccionar o tipo de utilização que há de cada serviço. Ao alterar o número de utilizações, bem como a duração das mesmas, o utilizador está directamente a configurar a intensidade de tráfego desta rede. Como se pode verificar, existe a distinção entre horário diurno e horário nocturno. O comportamento do programa perante esta distinção é de seleccionar aquele que tiver maior exigência em termos de tráfego.

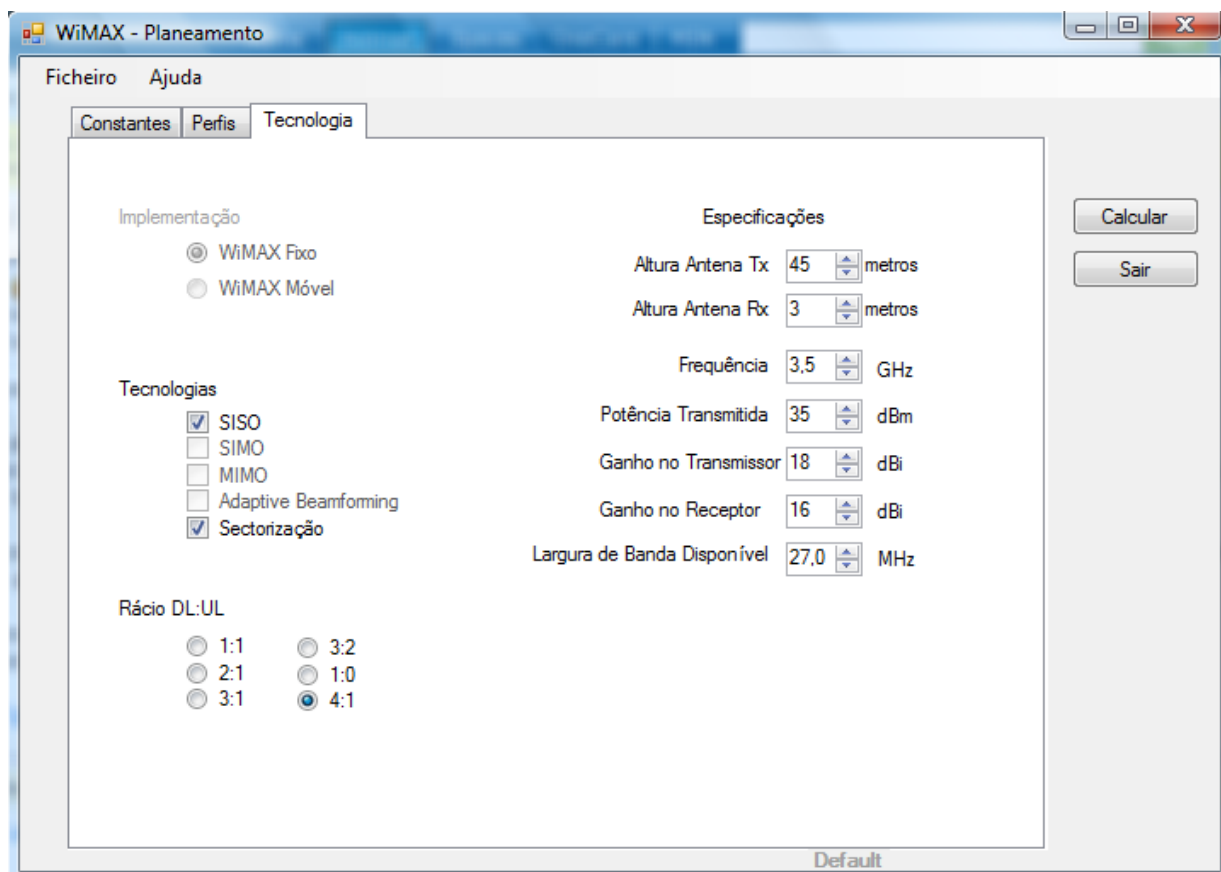


Fig. 6.5 – Vista do separador “Tecnologia” da ferramenta de planeamento de uma rede WiMAX

A figura 6.5 apresenta o aspecto do separador “Tecnologias”. Na parte de especificações, configuram-se principalmente os parâmetros que vão afectar directamente o alcance da célula. O campo “Largura de Banda Disponível” terá que ser preenchido com a quantidade de espectro disponível, atribuído pela entidade reguladora.

Tal como já foi referido anteriormente, esta ferramenta foi inicialmente idealizada para WiMAX Fixo, sendo por isso que a opção entre Fixo e Móvel se encontra desactivada. No que diz respeito às soluções tecnológicas que melhoram o desempenho do WiMAX, nesta aplicação só foram implementadas SISO e Sectorização. Por esse motivo, e pelo facto de serem também opções tipicamente para WiMAX móvel, as restantes opções encontram-se desactivadas.

Por fim, existe a secção “Rácio DL:UL”, que permite escolher qual a relação entre *Downlink* e *Uplink*. É frequente no mundo das telecomunicações existir esta preocupação na implementação de redes. Isto deve-se ao facto de tipicamente as aplicações necessitarem de maiores débitos no sentido *downlink* do que *uplink*, sendo que não se justifica a maior parte das vezes estes terem a mesma largura de banda reservada.

Após o preenchimento correcto de todos estes parâmetros, o utilizador pode pressionar em “Calcular” para que o programa inicie o tratamento de todos os dados introduzidos. Será então iniciada a ferramenta de cálculo tal como é apresentado na figura 6.6.

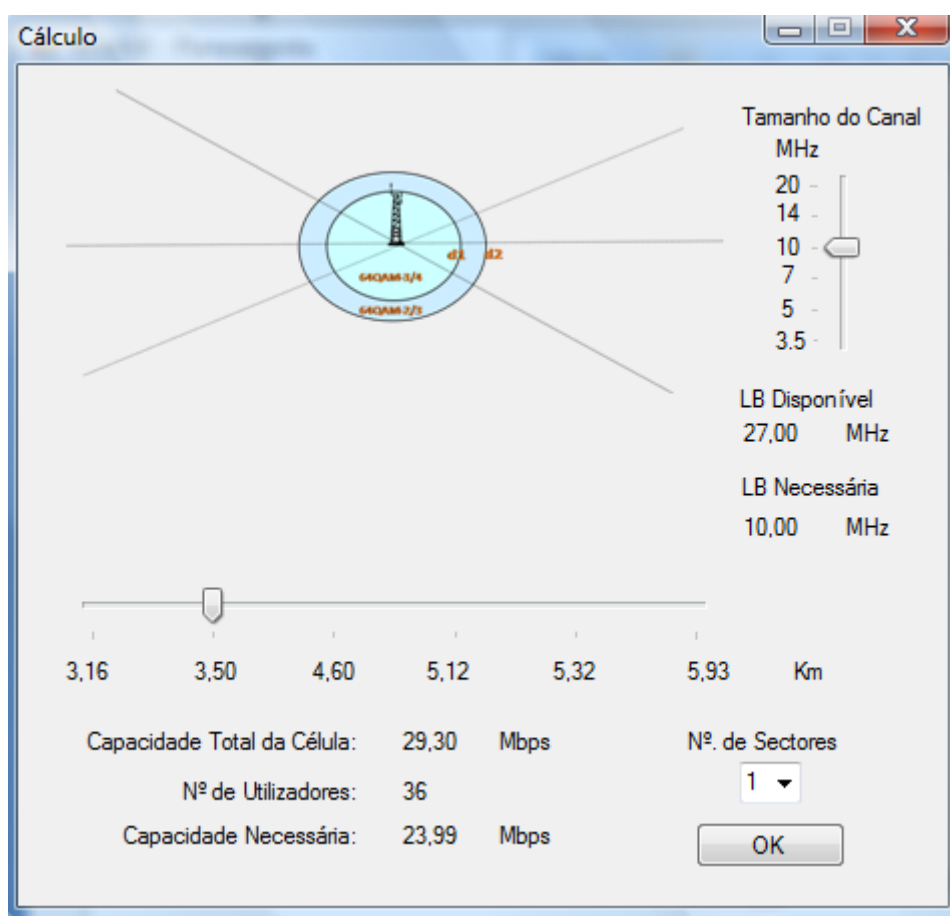


Fig. 6.6 – Vista da ferramenta de cálculo

Quando a ferramenta de cálculo é apresentada, todo o processamento dos dados já foi feito. O manejo das barras vertical e horizontal vai produzir, por isso, novos resultados de forma bastante rápida. A barra horizontal confere a possibilidade de aumentar ou diminuir o tamanho da célula. Este factor vai ter influência directa na área da célula, o que por conseguinte irá afectar o Nº de Utilizadores, a Capacidade Total da Célula e a Capacidade Necessária. A barra

vertical permite a selecção de canais de diferente tamanho. Este factor vai ter influência directa em diversos campos. São eles a Largura de Banda Necessária e as distâncias para cada modulação. O efeito da alteração destas distâncias é o já descrito na explicação do movimento da barra horizontal. Por fim, o número de sectores também pode ser ajustado. A alteração deste parâmetro irá ter influência directa na Capacidade Total da Célula, bem como na Largura de Banda Necessária.

O utilizador pode manejar livremente cada um dos parâmetros que a aplicação permite. Quando a capacidade da célula não é suficiente para satisfazer as necessidades, a cor do texto na Capacidade Necessária aparece a vermelho. Se por outro lado a Largura de Banda Disponível for menor que a Necessária, o texto nesta última também será vermelho.

6.4. Implementação das Funcionalidades da Ferramenta

A implementação da ferramenta não consiste apenas na aplicação directa das várias fórmulas apresentadas até ao momento. Na realidade, existe toda uma estratégia adoptada desde o início para manter a estrutura da aplicação coerente, fornecendo valores correctos.

Todos os cálculos são feitos da seguinte forma: no próprio código do programa já foram introduzidas 2 matrizes, com os parâmetros de capacidade e sensibilidade. São matrizes de dimensões 7x6, em que as 6 colunas correspondem ao tamanho do canal, e as 7 linhas correspondem a cada modulação. Assim, todos os cálculos feitos a seguir irão colocar os respectivos resultados no mesmo formato.

Inicialmente o programa calcula as distâncias para cada modulação, em cada largura de banda. Depois de saber as distâncias, o passo seguinte é calcular a área. Com este cálculo é já possível saber o número de utilizadores, multiplicando a densidade de utilizadores com a área total da célula. O conhecimento do número total de utilizadores permite então saber qual a capacidade necessária.

A capacidade do sistema depende sempre do número de sectores considerado. Caso a opção de sectorização não tenha sido seleccionada, a capacidade é multiplicada por um factor de 1. Caso contrário, é multiplicada por um factor igual ao número de sectores que foi seleccionado.

Uma vez que todos estes cálculos são feitos na inicialização da aplicação calculadora, e estão todos guardados em *arrays* de iguais dimensões, a manipulação da barra horizontal e vertical não faz mais do que posicionar os valores seleccionados nestes *arrays*. Isso possibilita que o cálculo de novos valores seja praticamente instantâneo.

Outra das estratégias adoptadas na concepção da ferramenta foi o uso de variáveis globais para armazenar os resultados. Este uso facilita não só a passagem de parâmetros entre os diversos formulários, mas também permite que na apresentação dos resultados não seja necessária a execução dos cálculos a cada ajuste feito por parte do utilizador.

As funções chave do funcionamento da aplicação são as seguintes:

- Extracção dos valores no formulário : Trata-se de uma função simples, que extrai todos os valores introduzidos pelo utilizador, armazenando-os em variáveis previamente definidas.
- Cálculo de intensidade de tráfego: Trata-se de uma função que mediante os valores relacionados com os vários serviços no que diz respeito a periodicidade e duração das chamadas, efectua o cálculo da intensidade de tráfego para cada serviço.
- Cálculo da capacidade para cada serviço: Após o cálculo da intensidade de tráfego, esta função irá usar estes valores para calcular a capacidade necessária para cada serviço, através do produto entre intensidade de tráfego para cada serviço e respectivo requisito de capacidade.
- Armazenamento das tabelas de Sensibilidade e Capacidade: São introduzidos no código as tabelas 2.5 e 4.7, em variáveis de dimensão [7x6].
- Cálculo da matriz distância: Esta função aplica as fórmulas já apresentadas anteriormente que fornecem a distância máxima para cada modulação. Assim, esta função irá devolver uma matriz, em que cada coluna corresponde às Larguras de Banda consideradas, e cada linha às várias modulações permitidas em WiMAX fixo.
- Cálculo da matriz área: através da matriz distância é calculada a área para cada modulação.

- Cálculo da matriz capacidade total necessária: Após estar calculada a área, é possível saber qual o número de utilizadores que é necessário servir, já que a densidade de utilizadores é uma das entradas que a aplicação exige ao seu utilizador. Assim, após o produto entre densidade de utilizadores e área, obtém-se o número de utilizadores. Este número multiplicado pela capacidade necessária para cada serviço oferece a capacidade total necessária.
- Cálculo da capacidade total da célula WiMAX: Sabendo qual a área para cada modulação e qual a capacidade total que cada modulação oferece é efectuado o cálculo da capacidade total, em que Capacidade Total é igual ao somatório do quociente entre a capacidade de cada modulação e a respectiva área que esta abrange.

Após todos estes cálculos estarem efectuados, a aplicação efectua a escolha da melhor opção, tendo como critério principal o custo mais baixo de implementação, tal como já foi referido. Assim, a estratégia por detrás desta implementação consiste na realização de vários ciclos repetitivos, em que todas as hipóteses de capacidade total da célula são comparadas com a capacidade necessária. Assim, a prioridade na escolha da implementação mais económica prende-se com o critério da sectorização; para que o menor número de sectores seja o seleccionado, basta que a ordem pelos quais os elementos são comparados seja do maior para o menor. Desta forma, inicialmente são analisados os valores com maior número de sectores, de forma decrescente até ao menor número, sendo assim guardada a opção com menor número de sectores.

Todo o funcionamento da aplicação está esquematizado na tabela 6.1.

Extracção de Valores	Os valores introduzidos pelo utilizador são extraídos e armazenados em variáveis.
Cálculo da Intensidade de Tráfego	Mediante os valores introduzidos, é efectuado o cálculo da intensidade de tráfego para cada serviço (ρ).
Cálculo da Capacidade para cada serviço	Conhecida a intensidade de tráfego para cada serviço, é calculada a capacidade para cada serviço. $C_{\text{Serviço}} = \rho * \text{Requisito}_{\text{Serviço}}$
Cálculo das distâncias	Conhecida a sensibilidade do receptor, calculam-se as várias distâncias, para cada modulação e para cada Largura de Banda (MHz) considerados. $d = d0.*10^{\left[\frac{P_T - L_S + G_R + G_T - S_R - X_f - X_h - s - 20 \log\left(\frac{4\pi d0}{\lambda}\right)}{10\gamma} \right]} \quad (4.1)$
Cálculo da área e número de utilizadores	O cálculo da área é imprescindível para determinar o número de utilizadores, já que um dos dados que a aplicação necessita é a densidade de utilizadores
Cálculo da Capacidade necessária para o cenário considerado	Sabendo o número de utilizadores (N) e a capacidade para cada serviço, é calculada a capacidade total necessária. $C_{\text{Total Necessária}} = N * \Sigma (C_{\text{Serviços}})$
Cálculo da capacidade da célula	Mediante a área de cobertura de cada modulação, é feito o cálculo da capacidade total da célula. $C_{\text{Total Célula}} = \Sigma (C_{\text{Modulação}} * (\text{Area}_{\text{Modulacao}} / \text{Area}_{\text{Total}}))$
Algoritmo de escolha da melhor opção	A aplicação efectua os cálculos das várias opções, seleccionando aquela que exige menor número de sectores e menor tamanho do canal em termos de largura de banda.
Ajustes do utilizador	Como todos os valores estão guardados em forma de matriz, é permitido ao utilizador o acesso a duas barras na aplicação (fig.6.6), cuja acção permite visualizar as várias soluções calculadas pela ferramenta. Actuando sobre a barra horizontal, o utilizador altera o alcance da célula, enquanto a barra vertical permite alterar a largura de banda do canal. Os resultados são apresentados de forma imediata na aplicação

Tabela 6.1 – Funcionamento da aplicação

6.5. Resultados Práticos

Agora que o funcionamento do programa está explicado, torna-se necessário utilizar um exemplo ilustrativo do mesmo. Desta forma, idealiza-se então uma rede WiMAX. Em termos de parâmetros tecnológicos, estes são apresentados na figura 6.7. A figura 6.8 apresenta, por sua vez, os perfis de utilizadores e respectiva densidade. Já o tipo de terreno considerado é urbano e os requisitos para cada serviço mantêm-se inalterados em relação aos que foram considerados no capítulo 5.

The screenshot shows the 'Tecnologia' (Technology) tab of a simulation software interface. The interface is divided into several sections:

- Constantes** (Constants): A tab at the top left.
- Perfis** (Profiles): A tab at the top middle.
- Tecnologia** (Technology): The active tab, showing various parameters.

The parameters are organized into sections:

- Implementação** (Implementation):
 - ☒ WiMAX Fixo
 - ☐ WiMAX Móvel
- Tecnologias** (Technologies):
 - ☒ SISO
 - ☐ SIMO
 - ☐ MIMO
 - ☐ Adaptive Beamforming
 - ☒ Sectorização
- Rácio DL:UL** (DL:UL Ratio):
 - ☐ 1:1
 - ☐ 2:1
 - ☐ 3:1
 - ☐ 3:2
 - ☐ 1:0
 - ☒ 4:1
- Especificações** (Specifications):
 - Altura Antena Tx: 45 metros
 - Altura Antena Rx: 3 metros
 - Frequência: 3,5 GHz
 - Potência Transmitida: 35 dBm
 - Ganho no Transmissor: 18 dBi
 - Ganho no Receptor: 16 dBi
 - Largura de Banda Disponível: 27,0 MHz

Fig. 6.7 – Parâmetros tecnológicos utilizados na simulação

Constantes **Perfis** Tecnologia

☒ Utilizador Residencial

Utilização	VoIP	Dados	IPTV	Media Stream	Jogos Online	P2P
Horário Diurno						
Nº de Utilizações	5	8	2	2	1	1
Duração (minutos)	8	45	45	10	50	60
Horário Nocturno						
Nº de Utilizações	3	4	1	0	0	0
Duração (minutos)	10	20	100	0	0	0

☒ Utilizador Empresarial

Utilização	VoIP	Dados	Videoconferência
Horário Diurno			
Nº de Utilizações	25	20	2
Duração (minutos)	3	10	100
Horário Nocturno			
Nº de Utilizações	5	1	0
Duração (minutos)	2	0	0

Densidade de Utilizadores

Utilizadores Residenciais 1,50 Utilizadores/Km²

Utilizadores Empresariais 1,50 Utilizadores/Km²

Fig. 6.8 – Perfis de utilizador presentes na rede

Após todos estes dados terem sido correctamente introduzidos na ferramenta, esta apresentou a solução da figura 6.9 como a melhor. Os critérios desenhados nesta ferramenta são, como já foi dito, o menor número de sectores possível e o tamanho do canal. Assim, esta solução apresenta apenas um sector, com um canal de 5 MHz. No entanto, o alcance da célula é de 1.55 km, o que poderá não ser suficiente para cobrir toda a área que se pretende. Assim, poderiam apresentar-se algumas soluções para este problema. Uma delas seria a de usar uma estrutura celular, com várias células com as mesmas características. Isto poderia implicar um maior custo de implementação.

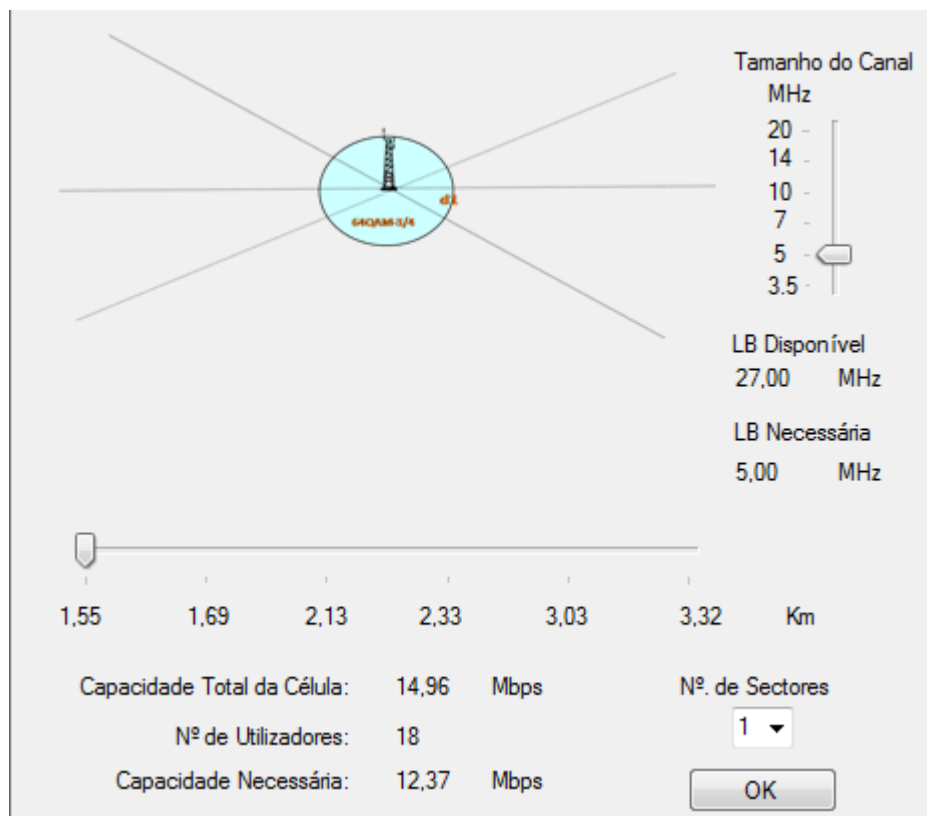


Fig. 6.9 – Primeira solução apresentada pela ferramenta de planeamento celular

A ferramenta permite o ajuste de todos os parâmetros para encontrar o que melhor se ajuste ao caso de estudo. Mantendo o tamanho do canal e aumentando o número de sectores para 3, é possível aumentar o alcance até 2.33 km, o valor máximo até onde a capacidade total da célula é superior à necessária. Com esta solução, presente na figura 6.10, o ganho em alcance permite cobrir uma área maior, e consequentemente servir um maior número de utilizadores. No entanto, está-se a usar uma solução com 3 sectores. Ainda poderá existir a possibilidade de conseguir um alcance semelhante utilizando um número menor de sectores, bastando para tal alterar o tamanho do canal. Como se considera ter uma Largura de Banda de 27 MHz, existe ainda uma boa margem de manobra para utilizar este espectro. A figura 6.11 é resultado deste tipo de manipulação. Ao reduzir o número de sectores e aumentar o tamanho do canal para 10 MHz, foi possível encontrar uma solução para este problema, sendo que a célula passa a ter um alcance de 2Km mas tem capacidade para satisfazer as necessidades existentes. É possível também encontrar mais soluções à medida que se aumenta o tamanho do canal. Exemplo disso é a figura 6.12, em que o tamanho do canal é o máximo e se consegue um alcance de 2.45 Km.

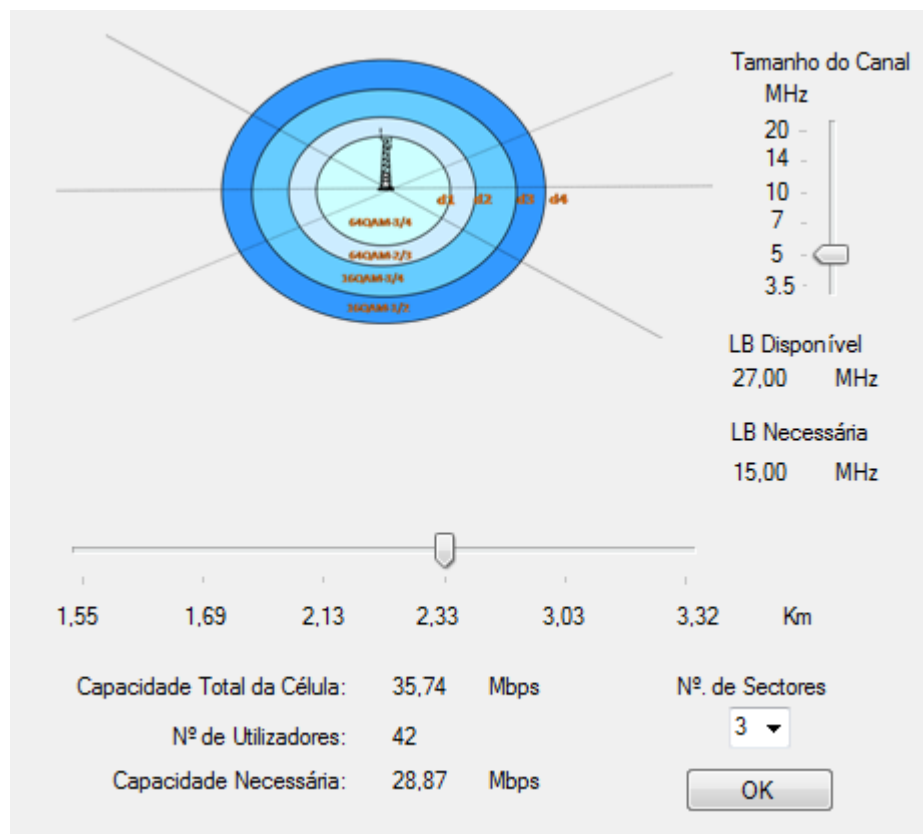


Fig. 6.10 – Solução possível apresentada pela ferramenta de planeamento celular, com 3 sectores

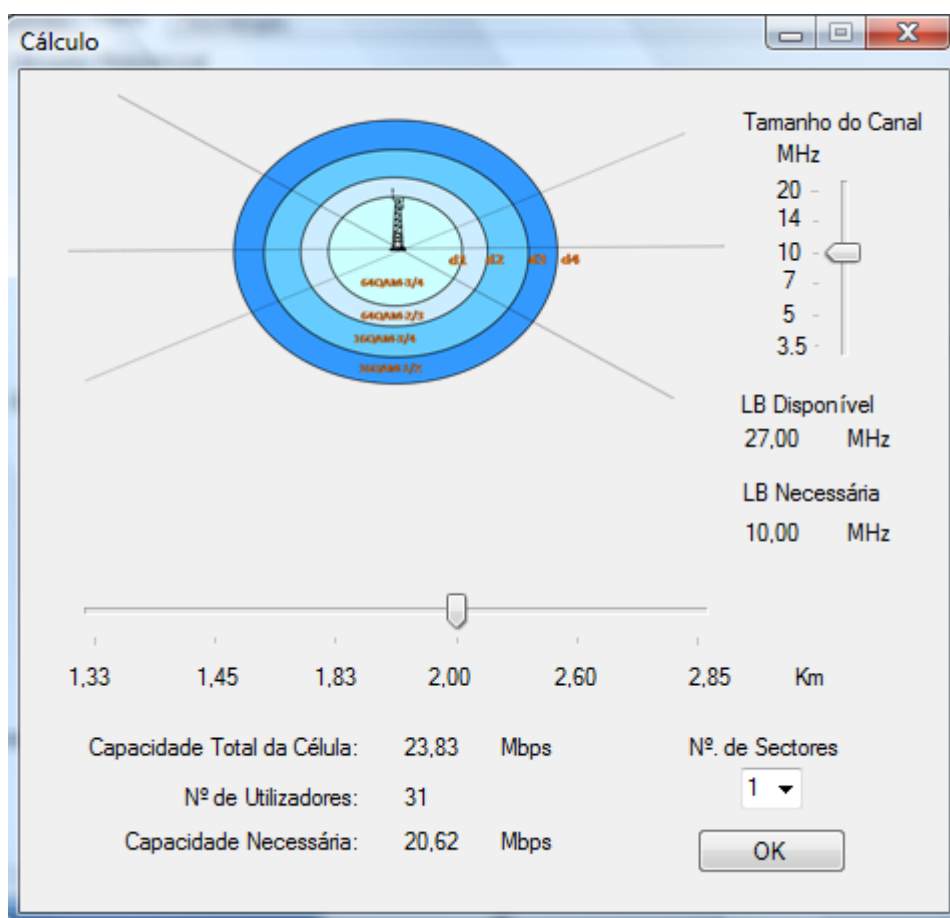


Fig. 6.11 – Outra possível solução apresentada pela ferramenta de planeamento celular

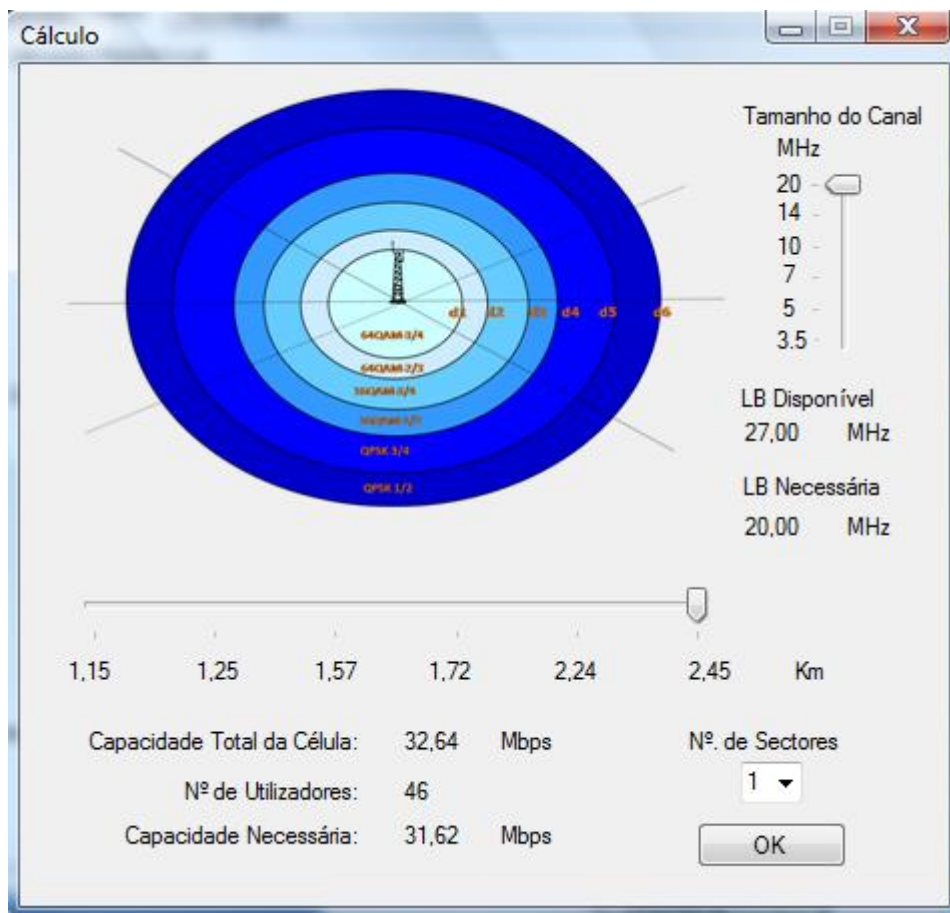


Fig. 6.12 – Outra possível solução apresentada pela ferramenta de planeamento celular, com maior alcance

Como é evidente, a ferramenta simplifica em muito o processo de cálculo que envolve o planeamento de uma célula WiMAX. No entanto, cabe ao utilizador escolher a melhor opção que se enquadre no caso de estudo. Há todo um conjunto de factores que devem ser postos em consideração: alcance pretendido, custo de implementação, largura de banda disponível. No entanto, estes são os factores com os quais o utilizador terá que lidar numa fase inicial, já que também terá que ter em linha de conta factores relacionados com a escalabilidade. Se por exemplo optar por canais de elevada largura de banda, provavelmente terá que enfrentar problemas de escassez de espectro se pretender colocar novos sectores ou construir uma estrutura celular com uma reutilização de frequências elevada.

Conclui-se, portanto, que o leque de opções é alargado e a aplicação desenvolvida ajuda a perceber rapidamente as várias opções existentes. Cabe, no entanto, ao utilizador seleccionar a opção que melhor satisfaça as necessidades presentes do caso em estudo, sem esquecer as necessidades futuras.

6.6. Sumário

Este capítulo dedicou-se à apresentação da aplicação de planeamento WiMAX desenvolvida no âmbito da dissertação. Assim, foi possível conhecer o seu modo de funcionamento, tendo sido obtidos resultados de forma bastante mais rápida e simples do que anteriormente.

Os resultados são expressos em termos de capacidade da célula e número de utilizadores, como ficou presente nas figuras 6.9 a 6.12. A possibilidade de alterar vários parâmetros é uma mais valia, já que permite a obtenção de diferentes resultados, sendo que as figuras seleccionadas apenas são alguns exemplos deste processo de optimização.

7. Conclusões e Trabalho Futuro

7.1. Conclusões

Neste trabalho efectuou-se um estudo acerca da possibilidade de implementação da tecnologia WiMAX em quatro cenários distintos. Em cada um dos cenários estudou-se o efeito de diversos parâmetros para se conseguir encontrar uma solução para suprir as carências dos seus utilizadores, em termos de capacidade.

Foi possível verificar que há certos factores que têm bastante influência no desempenho do sistema e, como tal, devem ser planeados cuidadosamente. Um exemplo disso mesmo é a altura a que se encontra a BS, que deverá ser elevada para que as perdas de percurso sejam minimizadas. Outro factor que é bastante influente é a largura de banda escolhida. Conclui-se que para canais com maior espectro consegue-se melhor desempenho. Mas o espectro é, normalmente, algo controlado e regulamentado pelo que se poderá tornar um entrave a escolha de maior largura de banda. Por outro lado, por vezes o projectista deve planejar a rede celular tendo em vista o desempenho em detrimento do alcance para poder servir uma densidade de utilizadores realista. Assim, ao reduzir o tamanho das células é possível aumentar a capacidade das mesmas.

Apresentou-se uma solução para uma aplicação que simplifica o processo de planeamento de uma rede WiMAX. Através da sua utilização é possível de forma rápida fazer um estudo acerca das várias possibilidades de implementação de uma célula, obtendo resultados a nível de alcance, capacidade, número de utilizadores que pode servir, largura de banda.

Este estudo serve, no entanto, para apenas se ter uma ideia um pouco vaga acerca da implementação de um cenário WiMAX, uma vez que carece de bastantes informações geográficas que poderão ser bastante importantes para a obtenção de um planeamento mais eficiente. Fenómenos como por exemplo a refacção no topo de edifícios, ou *shadowing* não são previstos pelo modelo empírico utilizado (SUI). Para fazer um planeamento o mais eficiente possível recomenda-se o recurso a *software* SIG (Sistema de Informação Geográfica), já que este tipo de *software* lida com informações topográficas da área a implementar, podendo prever com bastante precisão quais as zonas LOS ou NLOS usando, também, modelos de propagação bastante completos.

No que diz respeito aos resultados obtidos, pode-se dizer que se tem agora uma perspectiva bastante melhor acerca da capacidade de uma rede WiMAX para satisfazer as necessidades de utilizadores fixos. Na verdade, existe toda uma variedade de parâmetros que se deve ter em conta quando se está a projectar este tipo de redes e, após os resultados obtidos, já é possível prever qual o efeito que cada um deles apresenta.

O WiMAX é uma tecnologia cujo potencial é enorme, por estar a ser desenvolvido tendo em vista a resolução de problemas reais. Utiliza a tecnologia OFDM (e S-OFDMA), o que permite um bom desempenho ao mesmo tempo que oferece robustez para fazer face a problemas típicos de comunicações sem fios.

Trata-se de uma tecnologia que tem uma particularidade bastante importante: o facto de suportar QoS. A existência de classes de serviço permite que haja diferenciação no tipo de tráfego que circula na rede. Assim, é possível oferecer melhor serviço ao tráfego que seja considerado prioritário, como por exemplo conversações em tempo real.

As inúmeras aplicações que esta tecnologia pode oferecer poderão tornar-se uma mais valia num futuro próximo, já que vão de encontro a um dos objectivos a atingir pelo mundo das telecomunicações: Ubiquidade. Através desta tecnologia será possível oferecer acesso à internet a locais até agora inacessíveis ou aos quais seria bastante dispendiosa a implementação de qualquer serviço com fios. Em termos de uso rural, o WiMAX é, de facto, uma solução aliciante para fornecer serviços de voz, dados e televisão a zonas que até então não seriam cobertas. Estas zonas terão boas condições para a implementação de redes sem fios, na medida em que não terão muitos obstáculos com efeitos destrutivos no sinal.

7.2. Trabalho Futuro

Na secção 6 ficou bastante claro que a aplicação desenvolvida possui funcionalidades que se encontram desactivadas. Assim, a ferramenta de planeamento celular ainda só tem desenvolvidos os módulos para fazer o planeamento de WiMAX Fixo.

No entanto, antes de passar para o WiMAX móvel e ainda WiMAX com topologia em malha, é necessário primeiro efectuar alguns cálculos, nomeadamente no que diz respeito às soluções tecnológicas. Como todo o estudo está feito em termos de capacidade, terá que ser feita uma previsão

acerca do impacto que a introdução de cada uma dessas tecnologias terá em termos de capacidade. Para além disto, também será necessário perceber qual o efeito no alcance obtido. A aplicação terá, então, que ter um melhor algoritmo de escolha da melhor opção de implementação, na medida em que o algoritmo implementado poderá revelar-se insuficiente.

Posto isto, pode-se dizer que como trabalho futuro se pode considerar o estudo detalhado de WiMAX móvel e em malha, para posterior integração na aplicação desenvolvida.

8. Referências

- [1] IEEE, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Standard 802.16-2004, IEEE, New York, 2004.
- [2] IEEE, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Standard 802.16-2005, IEEE, New York, 2005.
- [3] – Andrews J. G., Ghost A., Muhamed R., Fundamentals of WiMAX, Prentice Hall, 2007
- [4] – Ahson S., ILYAS M., WiMAX Applications, CRC Press, 2007
- [5] – Ahson S., ILYAS M., WiMAX Technologies, CRC Press, 2007
- [6] - Ahson S., ILYAS M., WiMAX Standards and Security, CRC Press, 2007
- [7] – Nuaymi L, WiMAX – Technology for Broadband Wireless Access, John Wiley and Sons, 2007
- [8] – Jain R, WiMAX PART I: PHY, Washington University of Saint Louis, 2008
- [9] – Ramamurthy H and Gadh R, 802.16 Network Planning Tool, WINMEC, 2003
- [10] – Gray D, A Comparative Analysis of Mobile WiMAX Deployment Alternatives in the Access Network, WiMAX Forum, 2007
- [11] – Sargento S., Gestão de Recursos em Redes com Suporte de Qualidade de Serviço, 2003
- [12] – Zhang Y., Hwa Chen H., Mobile WiMAX Toward Wireless Metropolitan Area Networks, Taylor and Francis Group, 2008
- [13] – Afric W, Matosic N, Vakante D, WiMAX on 3.5GHz Cell Calculation, IEEE, Croatia, 2006
- [14] – K.Raghunath, Fixed WiMAX Cell Design, 2007
- [15] – Pareek D., The Business of WiMAX, Wiley, 2006
- [16] – www.anacom.pt
- [17] – www.wimax360.com
- [18] – www.bandcalc.com
- [19] – www.iptvarticles.com
- [20] – Sargento S., Nogueira A, Textos de Apoio de Análise de Redes de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, 2007